

ผลการศึกษาค่าความถี่วิกฤติชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เปรียบเทียบกับ  
แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความผิดปกติ  
ภายในชั้นอีที่เกิดขึ้นเหนือจังหวัดชุมพร ประเทศไทย

STUDY OF CRITICAL FREQUENCY IN IONOSPHERIC E REGION COMPARED  
WITH INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE MODEL AND  
INVESTIGATION PERTURBATION IN E REGION OVER CHUMPHON, THAILAND

ประมินทร์ วงษ์เจริญ

PORAMINTRA WONGCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-010-030

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

ผลการศึกษาค่าความถี่วิกฤติชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เปรียบเทียบกับ  
แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความผิดปกติ  
ภายในชั้นอีที่เกิดขึ้นเหนือจังหวัดชุมพร ประเทศไทย

STUDY OF CRITICAL FREQUENCY IN IONOSPHERIC E REGION COMPARED  
WITH INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE MODEL AND  
INVESTIGATION PERTURBATION IN E REGION OVER CHUMPHON, THAILAND



ปรมินทร์ วงษ์เจริญ

PORAMINTRA WONGCHAROEN

สารทมูล.....  
เลขทะเบียน..... 138778  
รับเดือนปี..... 16 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-010-030

STUDY OF CRITICAL FREQUENCY IN IONOSPHERIC E REGION COMPARED  
WITH INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE MODEL AND  
INVESTIGATION PERTURBATION IN E REGION OVER CHUMPHON, THAILAND

PORAMINTRA WONGCHAROEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015  
KMITL-2015-EN-M-010-030

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

**คณะวิศวกรรมศาสตร์**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

---

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลการศึกษาค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เปรียบเทียบกับแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความผิดปกติภายในชั้นอีที่เกิดขึ้นเหนือจังหวัดชุมพร ประเทศไทย

Thesis Title Study of Critical Frequency in Ionospheric E Region Compared with International Reference Ionosphere model and Investigation Perturbation in E Region Over Chumphon, Thailand

นักศึกษา นายปรมินทร์ วงษ์เจริญ


รหัสประจำตัว 54611846

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-010-030

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุวิพล	สิทธิชีวกาศ	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
ศ.ดร.ประยุทธ์	อัครเอกมาลิน	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลการศึกษาค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เปรียบเทียบแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์และความผิดปกติภายในชั้นอีที่เกิดขึ้น เหนือจังหวัดชุมพรประเทศไทย
นักศึกษา	นายปรมินทร์ วงษ์เจริญ
รหัสประจำตัว	54611846
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่พิจารณาจากผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤต ( $f_oE$ ) บนไอโอโนแกรมที่วัดด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด ที่ใช้วัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. ของเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 ซึ่งบริเวณที่ทำการศึกษาสภาพชั้นบรรยากาศตั้งอยู่ที่ตำแหน่งละติจูด  $10.72$  องศาเหนือ ตำแหน่งลองจิจูด  $99.37$  องศาตะวันออกและที่ตำแหน่งละติจูด  $3$  องศาเหนือตามการพิจารณา แนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก จากค่า  $f_oE$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ได้จากการวัดจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทำนายค่า  $f_oE$  ด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือแบบจำลอง IRI 2012 (International Reference Ionosphere 2012 model) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงเป็น เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างค่า  $f_oE$  ของผลทำนายด้วยแบบจำลองกับค่า  $f_oE$  ที่สามารถวัดได้ รวมถึงแสดงเป็นค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error) เพื่อใช้เป็น ดัชนีผลต่างของแบบจำลองและผลการวัดสภาพชั้นบรรยากาศสำหรับนำไปใช้ปรับปรุงแบบจำลอง IRI นอกจากนี้การการวัดค่า  $f_oE$  ที่พบยังสามารถพิจารณาปรากฏการณ์ความผิดปกติที่เรียกว่า

ชั้นสพอเรติก-E ที่เกิดขึ้นใกล้กับบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก (Magnetic equatorial sporadic-E) ที่พิจารณาจากผลการวิเคราะห์ตัวแปรค่าความถี่วิกฤตชั้นสพอเรติก-E ที่เกิดขึ้นบนชั้นไอโอโนสเฟียร์ (foEs) โดยผลการวิเคราะห์ค่า foEs ที่ได้จะแสดงระดับแนวโน้มความเบี่ยงของชั้นสพอเรติก-E ที่เกิดขึ้นตามเวลาเหนือสถานีตรวจวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่อาจมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางขนาดของสัญญาณดาวเทียม

<b>Thesis</b>	Study of Critical Frequency in Ionospheric E Region Compared with International Reference Ionosphere model and investigation perturbation in E region over Chumphon, Thailand
<b>Student</b>	Mr.Poramintra Wongcharoen
<b>Student ID.</b>	54611846
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Suthichai Noppanakeepong
<b>Thesis Co-Advisor</b>	Asst.Prof.Dr. Somkiat Lerkvaranyu

## ABSTRACT

This thesis proposes the studying of E region variation in the ionosphere layer during 7.00 a.m. till 5.00 p.m. from January 2004 to December 2009 analyzed by critical frequency (foE) on ionograms using ionosonde technique. The ionosonde equipment measuring for ionospheric condition is installed at the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Chumphon campus are located on geographic latitude 10.72°N latitude 99.37°E and 3°N of magnetic equator. The seasonal observed foE variation along the time is compared to the IRI foE predictions (International Reference Ionosphere 2012 model) and demonstrated as error percentage. In addition, the comparison between the observed foE variation and IRI foE predictions is calculated as the root mean square error. It is used to toward improve the IRI model over magnetic equatorial. Besides the observed foE variation, the studying considered the irregularity diffuse exceeding foE value called "sporadic-E", that also cogitated on the ionogram.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ทั้งนี้เพราะกำลังใจจากบิดา มารดา คุณอาที่เคารพเปรียบดั่งมารดารวมถึงครอบครัว ญาติ มิตรและผู้มีพระคุณทุกท่านที่เป็นแรงบันดาลใจคอยส่งเสริมและผลักดันเป็นผลให้สำเร็จออกมาเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณความอนุเคราะห์ที่มีให้ตลอดการทำวิทยานิพนธ์ จากอาจารย์ประจำภาควิชาทั้งหมด 3 ท่านคือ รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาศิพงษ์ และ ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุกสิ่งทุกอย่าง รวมถึงคอยเสนอแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยที่เป็นเนื้อหาส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณ นายสราวุธ รุ่งเรืองวชิเอก ดร.นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์ และ ผศ.ดร.ประเสริฐ เคนพันธ์ค้อ ที่แบ่งปันประสบการณ์งานวิจัย และคอยให้คำปรึกษา ตอบข้อสงสัยเรื่องชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ Dr. Takuya Tsugawa and Dr. Hiromitsu Ishibashi จากสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติประเทศญี่ปุ่น (National Institute of Information and Communications Technology : NICT) ที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือดูแลด้านข้อมูลและเครื่องมือตรวจวัดชั้นบรรยากาศ ภายใต้โครงการร่วมวิจัยชื่อ “SEALION” (SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network) รวมถึงขอบคุณ Professor Seishiro Ishii จากมหาวิทยาลัยเซนได (Sendai University) ที่ได้อธิบายหลักการทำงานของระบบไอโอโนโซนด

ปรมินทร์ วงษ์เจริญ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	5
2.1 ลักษณะของชั้นบรรยากาศโลก.....	6
2.1.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง.....	6
2.1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	8
2.1.2.1 ชั้น D.....	12
2.1.2.2 ชั้น E.....	13
2.1.2.3 ชั้น F.....	13
2.1.3 ลักษณะปรากฏการณ์สปอเรติก-E ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	13
2.2 อิทธิพลจากปฏิกิริยาที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์.....	15
2.2.1 จุดดับบนดวงอาทิตย์.....	16
2.2.2 สัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตร.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 ฤดูกาล.....	18
2.4 แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	19
2.5 เทคนิคไอโอโนโซนด.....	23
<b>บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย.....</b>	<b>28</b>
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	28
3.1.1 อุปกรณ์และโครงสร้างของเทคนิคไอโอโนโซนด.....	28
3.1.1.1 ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับในระบบไอโอโนโซนด.....	30
3.1.1.2 สายอากาศอินเวอร์ต-วีไดโพล.....	31
3.1.1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับตรวจสอบข้อมูลระบบไอโอโนโซนด.....	32
3.2 ตัวแปรที่พิจารณาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	33
3.2.1 ตัวแปรบนข้อมูลภาพไอโอโนโซนด.....	34
3.2.2 การใส่หมายเหตุอธิบายเหตุผล.....	36
3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมวัดค่าตัวแปรบนไอโอโนแกรม.....	42
<b>บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤตชั้นอีและแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐาน</b>	
<b>ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....</b>	<b>46</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	47
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตชั้นอี	
ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน.....	47
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตชั้นอี	
ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบฤดูกาล.....	50
4.2 แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	52

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดระหว่างแบบจำลอง IRI 2012 กับข้อมูลความถี่วิกฤตขั้นอื่นี.....	53
4.3.1 ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด.....	54
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง.....	57
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความถี่วิกฤตขั้นสปอเรติก-E.....	59
5.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤตขั้นสปอเรติก-E.....	60
5.1.1 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความถี่วิกฤตขั้นสปอเรติก-E แบบรายวัน.....	60
5.1.2 ผลวิเคราะห์พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของความถี่วิกฤต ขั้นสปอเรติก-E แบบฤดูกาล.....	62
5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความถี่วิกฤตขั้นสปอเรติก-E.....	64
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	70
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวกก. ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	79

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เหตุการณ์สำคัญเกี่ยวกับโครงการแบบจำลองอ้างอิงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	21
3.1 รายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์ในระบบไอโอโนโซนด์.....	30
4.1 จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์และค่าดัชนีของคลื่นความยาว 10.7 เซนติเมตร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552.....	48
4.2 ค่าราคาที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองระหว่างค่า foE ที่สามารถวัดได้ พิจารณาเปรียบเทียบกับค่า foE ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง IRI.....	57

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างชั้นบรรยากาศในเวลากลางวัน.....	5
2.2 กระบวนการไอออโนเซชัน.....	9
2.3 กระบวนการรวมตัวกันของโมเลกุลในชั้นบรรยากาศ.....	10
2.4 แผนที่โลกและตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์.....	11
2.5 ปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	12
2.6 โครงสร้างและลักษณะของดวงอาทิตย์.....	16
2.7 แนวโน้มของวัฏจักรสุริยะและจุดดับบนดวงอาทิตย์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ถึง ค.ศ. 2019.....	17
2.8 แนวโน้มดัชนีคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 ถึง ค.ศ. 2019.....	18
2.9 การแบ่งฤดูโดยพิจารณาตามระนาบการตกกระทบของลำแสงจากดวงอาทิตย์.....	19
2.10 รายชื่อสมาชิกคณะทำงานวิจัยจากทั่วโลกของโครงการแบบจำลอง IRI.....	20
2.11 ลักษณะการวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด์.....	25
2.12 ภาพไอโอโนแกรมและตัวแปรที่วัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	27
2.13 ตัวแปรจากการสะท้อนกลับมาของพัลส์ความถี่.....	27
3.1 บล็อกไดอะแกรมระบบการทำงานของเครื่องไอโอโนโซนด์.....	29
3.2 ชุดอุปกรณ์เครื่องส่งเครื่องรับภายในระบบไอโอโนโซนด์.....	31
3.3 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบอินเวอร์ต-วีไดโพล.....	32
3.4 ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลไอโอโนแกรม.....	33
3.5 ลักษณะพัลส์ความถี่ที่ถูกส่งไปตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	34
3.6 ตัวแปรบนไอโอโนแกรมในช่วงเวลาที่ไม่มีความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	35
3.7 ตัวแปรบนไอโอโนแกรมในช่วงเวลาที่มีความผิดปกติชั้นสพอเรติก-E.....	35
3.8 ตารางตัวแปรที่ได้จากการวัดค่าบนไอโอโนแกรม.....	37
3.9 สถานะตัวแปร foE มีสถานะเป็นA.....	37
3.10 สถานะตัวแปร foE มีสถานะเป็นB.....	38

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 กรณีตัวอย่างเมื่อตัวแปร foEs มีสถานะเป็นD.....	38
3.12 สถานะตัวแปร foEs มีสถานะเป็นE.....	39
3.13 สถานะตัวแปร foE มีสถานะเป็นF.....	40
3.14 สถานะตัวแปร foEs อยู่ในกรณีที่เป็น G.....	40
3.15 ตัวอย่างการพิจารณาตัวแปร foEs ที่อยู่ในเงื่อนไข J.....	41
3.16 ตัวแปร foE ที่พิจารณาเป็นกรณี S.....	41
3.17 สถานะตัวแปร foE อยู่ในกรณีที่เป็น U.....	42
3.18 หน้าต่างแสดงการสร้างไฟล์และการเลือกตัวแปรที่พิจารณา.....	43
3.19 การวัดค่าตัวแปร foE ในกรณีปกติ.....	43
3.20 ความถี่สูงสุดของตัวแปร fxEs ในชั้นสเปเรติก-E.....	44
3.21 ค่าตัวแปร foEs ที่พิจารณาจากตัวแปร fxEs.....	45
4.1 ค่า foE ที่วัดได้แบบรายวัน.....	49
4.2 ผลการวิเคราะห์ค่า foE แบบฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552.....	51
4.3 ผลการทำนายค่า foE แบบฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552.....	53
4.4 เพอร์เซ็นต์ผิดพลาดระหว่างค่าความถี่วิกฤติชั้น E ที่ได้จากแบบจำลอง IRI 2012 กับค่าความถี่วิกฤติชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถวัดได้.....	55
5.1 ผลวิเคราะห์ค่า foEsแบบรายวัน.....	61
5.2 ผลวิเคราะห์ค่าfoEs แบบฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552.....	63
5.3 เพอร์เซ็นต์การเกิดสเปเรติก-E ในแต่ละปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552.....	64
5.4 แนวโน้มความเบี่ยงเบนของค่า foEs ตามฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552.....	65

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นับตั้งแต่กุกลีเอลโม มาร์โคนี (Guglielmo Marconi) ทำการทดลองส่งความถี่ข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกสำเร็จเมื่อปีค.ศ. 1901 ขณะนั้นถือเป็นจุดเริ่มต้นของการสื่อสารระยะไกลที่อาศัยการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านไอออโนสเฟียร์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จนกระทั่งในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงและประยุกต์รูปแบบการใช้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อการสื่อสาร เช่น การสื่อสารแบบสถานีหนึ่งไปยังสถานีหนึ่ง หรือจากดาวเทียมมายังสถานีภาคพื้นดิน ซึ่งลักษณะการสื่อสารตามที่กล่าวมามีผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [1] ในที่นี้ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยนิยามนั้น [2,3] คือชั้นบรรยากาศที่มีระดับความสูงประมาณ 50-500 กิโลเมตรจากพื้นโลกและมีโครงสร้างเป็นองค์ประกอบทางเคมีของพลาสมาก๊าซต่างๆ เช่น ออกซิเจน ( $O_2$ ), ไนโตรเจน ( $N$ ), ไนตริกออกไซด์ ( $NO$ ) เป็นต้น และเมื่อพลาสมาถูกกระตุ้นด้วยอิทธิพลรังสีที่แพร่กระจายมาจากดวงอาทิตย์จะทำให้เกิดการไอออไนซ์เข้มข้นกลายเป็นอิเล็กตรอน ไอออน และอนุภาคที่เป็นกลาง (Neutron) ที่เคลื่อนตัวภายในชั้นบรรยากาศรวมทั้งอำนาจสนามแม่เหล็กโลกก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณอิเล็กตรอนในการศึกษาลักษณะพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ วิธีพื้นฐานวิธีหนึ่งที่เรียกว่า "เทคนิคไอโอโนโซนด" เป็นวิธีที่แสดงให้เห็นโครงสร้างชั้น  $E$ ,  $F_1$  และ  $F_2$  ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันตามระดับความสูง ( $h'$ ) และความถี่วิกฤตีสัมมูล ( $f_o$ ) รวมถึงปรากฏการณ์ความผิดปกติที่แสดงจากภาพไอโอโนแกรม ซึ่งความรู้จากการศึกษาคุณสมบัติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารเช่น การสื่อสารแบบคลื่นฟ้า (Sky wave) ที่อาศัยชั้นบรรยากาศในการสะท้อนความถี่ย่านความถี่สูง (High frequency) หรือการชดเชยสัญญาณจากกรณีซินทิลเลชัน (Scintillation) ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียมเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของปริมาณอิเล็กตรอนในบริเวณที่สัญญาณถูกส่งผ่าน

ในการศึกษาเกี่ยวกับความถี่วิกฤตีสัมมูลชั้น  $E$  ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ( $f_oE$ ) เป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับพิจารณาความเหมาะสมของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นวิทยุผ่านชั้นบรรยากาศ

ไอโอโนสเฟียร์ โดยความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลาของแต่ละวันหรือฤดูกาล และอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของ ปฏิกริยาที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์อย่าง เช่น สัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตร (Radio flux noise 10.7 cm.) รวมถึงจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot) ดังนั้นในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่นำเสนอ ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงจากการวัดค่าความถี่วิกฤติภายในชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [4,5,6,7,8,9] นอกจากนี้ภายในชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ยังมีปรากฏการณ์ความแปรปรวน ที่เรียกว่าปรากฏการณ์สปอเรติก-E ประเภทคิว ซึ่งการเกิดปรากฏการณ์ลักษณะดังกล่าวเหนือบริเวณ แนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก (Magnetic equator sporadic-E) ความแปรปรวนของอิเล็กตรอน ที่เกิดจากกระบวนการยกตัวของชั้นบรรยากาศทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศกระจายตัว ในลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ (Gradient drift process) [10,11] นอกจากนี้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปรากฏการณ์สปอเรติก-E ยังมีแนวโน้มความสัมพันธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ทางขนาดของสัญญาณดาวเทียม (Amplitude scintillation) [12,13] และผลกระทบต่อการใช้งานของสัญญาณดาวเทียมที่ถูกส่งผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดชั้นสปอเรติก-E [14] อย่างไรก็ตาม แม้จะมีการศึกษาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า foE รวมถึงค่า foEs จากปรากฏการณ์สปอเรติก-E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกแต่กลับพบว่าข้อมูลการศึกษา พฤติกรรมดังกล่าวเหนือบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ยังไม่เพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ เพื่อประยุกต์ใช้งาน

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการศึกษาและการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลง ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่พิจารณาจากตัวแปรค่า foE และการเกิดปรากฏการณ์ ชั้นสปอเรติก-E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประเภทคิวโดยพิจารณาจากตัวแปรค่า foEs ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นตามเวลาแบบรายวันและแบบฤดูกาล รวมถึงอิทธิพลจากแนวเส้นศูนย์สูตร สนามแม่เหล็กโลกและอิทธิพลจากปฏิกริยาดวงอาทิตย์ จากข้อมูลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถ บันทึกลงด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด์เหนือสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ซึ่งเป็นบริเวณที่ตั้งอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก จากปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 โดยในระหว่างปีดังกล่าวเป็นช่วงที่อิทธิพลของปฏิกริยาจากดวงอาทิตย์มีค่าลดลง จนกระทั่งมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ตัวแปรค่า foE ที่สามารถวัดได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า foE

ที่ทำนายจากแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (IRI-2012) โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่า foE ที่สามารถวัดได้จะถูกนำไปใช้พิจารณาเพื่อปรับปรุงรูปแบบการทำนายค่าตัวแปร foE ของแบบจำลอง IRI สำหรับการพิจารณาสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [15,16]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากค่า foE เหนือสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้แนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก

1.2.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ระหว่างค่า foE ที่สามารถวัดได้กับแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เพื่อนำไปใช้พิจารณาการปรับปรุงการทำนายค่าตัวแปร foE

1.2.3 ศึกษาลักษณะความผิดปกติของปรากฏการณ์สปอเรติก-E ประเภทคิวที่เกิดขึ้นภายในบริเวณชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นใกล้กับบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่างๆทั้งหมด 6 บทได้แก่ บทที่ 1 ที่กล่าวถึงความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัยการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากตัวแปรค่า foE ที่วัดได้เหนือสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรเพื่อเปรียบเทียบค่า foE ที่ทำนายจากแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือแบบจำลอง IRI-2012 (International Reference Ionosphere 2012) และนอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ยังนำเสนอการพิจารณาลักษณะความผิดปกติที่เรียกว่าปรากฏการณ์สปอเรติก-E (Sporadic-E) ที่เกิดขึ้นใกล้กับบริเวณเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งอิทธิพลจากเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกจะก่อให้เกิดปัจจัยที่มีผลต่อความผิดปกติภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

สำหรับในบทที่ 2 จะกล่าวถึงเนื้อหาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับลักษณะโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และอิทธิพลของปฏิกิริยาที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ ฤดูกาล รวมถึงลักษณะความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงเทคนิคที่นำมาใช้

ในการวิจัยและข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น เทคนิคไอโอโนโซนด์ที่นำมาใช้วัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

บทที่ 3 นำเสนอลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ไอโอโนโซนด์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย การอธิบายวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลค่า foE รวมถึงการใส่หมายเหตุและการพิจารณาลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์ชั้นสไปเรติก-E ที่ได้จากการแปรความหมายข้อมูลบนภาพไอโอโนแกรมที่สามารถวัดได้เหนือบริเวณสถานีตรวจวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร

บทที่ 4 แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงจากค่า foE ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถวัดได้เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร เพื่อนำไปพิจารณาหาร้อยละความผิดพลาดระหว่างค่าความถี่วิกฤตชั้น E ที่สามารถวัดได้กับผลการทำนายที่คำนวณจากแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลต่างข้อมูลค่า foE ที่ประมาณจากค่ารากความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error) ระหว่างข้อมูลที่สามารถวัดได้กับแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐาน

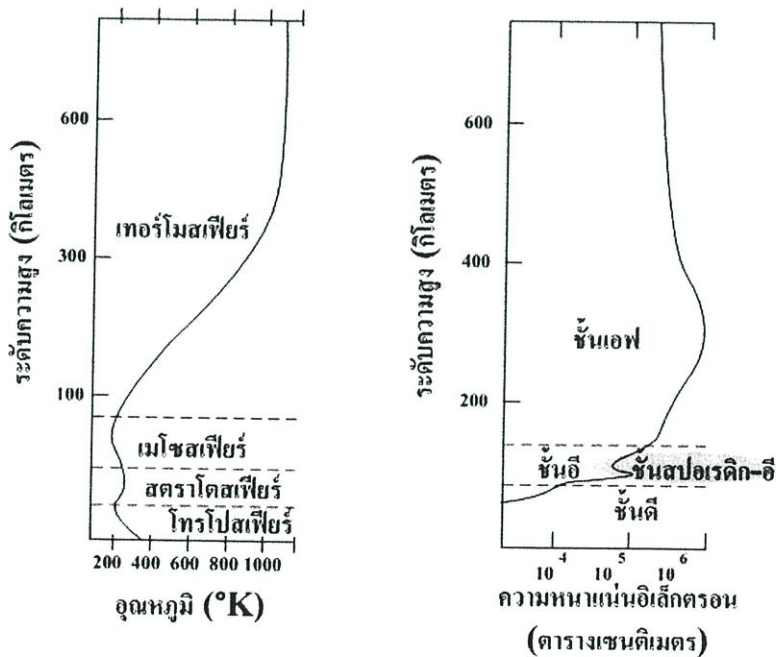
บทที่ 5 จากผลการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “ชั้นสไปเรติก-E” หรือค่า foEs ที่ได้ในช่วงเดียวกับการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า foE ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถวัดได้เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร โดยการแปรความหมายข้อมูลจะใช้การอธิบายจากลักษณะการกระจายตัวของค่า foEs ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแบบรายวันและแบบฤดูกาลจากค่าความเบนมาตรฐาน (standard deviation) เพื่อแสดงให้เห็นแนวโน้มการกระจายตัวของค่า foEs ประเภทคว (Sporadic-E Q type) ที่เกิดขึ้นเหนือสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่อยู่ใกล้แนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก

และในบทสุดท้ายของวิทยานิพนธ์เป็นการสรุปผลงานวิจัยและอภิปรายเพื่อเป็นข้อเสนอแนะสำหรับใช้พิจารณาการศึกษาความเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากตัวแปรค่า foE และค่า foEs เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร หรือบริเวณอื่นซึ่งตั้งอยู่รอบตำแหน่งแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก

## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์บทนี้เป็นพื้นฐานที่จำเป็นในการศึกษาพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่กล่าวถึงลักษณะของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์โดยทั่วไปรวมถึงลักษณะของปรากฏการณ์สปอเรติก-E ที่เกิดขึ้นภายในชั้นไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณตำแหน่งเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก วัฏจักรสุริยะ ฤดูกาลที่มีอิทธิพลต่อลักษณะ การเปลี่ยนแปลงภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตลอดจนหลักการของเทคนิคไอโอโนโซนด์ ที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการสังเกตพฤติกรรมชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อย่างไรก็ตาม นอกจากทฤษฎีและเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามที่ได้กล่าว ไปก่อนหน้านี้แล้ว แบบจำลอง IRI หรือ International Reference Ionosphere เป็นแบบจำลองอ้างอิง มาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่นำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายใน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างชั้นบรรยากาศในเวลากลางวัน [17]

## 2.1 ลักษณะของชั้นบรรยากาศโลก

ชั้นบรรยากาศโลกถูกอธิบายโดยจำแนกเป็น 2 ลักษณะคือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางไม่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า(Neutral Atmosphere) และชั้นบรรยากาศที่เกิดจากการไอออไนซ์ก๊าซ (Ionized atmosphere) ในรูปที่ 2.1 ซ้ายมือแสดงลักษณะโครงสร้างของชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางโดยจัดลำดับชั้นตามข้อมูลอุณหภูมิต่ำ ขวามือคือลักษณะโครงสร้างชั้นบรรยากาศที่เกิดจากการไอออไนซ์ของก๊าซโดยในการจัดลำดับชั้นนั้นจะจำแนกตามความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

### 2.1.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง

ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางในที่นี้คือชั้นบรรยากาศที่มีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 4 ชั้นตามอุณหภูมิต่ำที่เกิดขึ้น ได้แก่ชั้นโทรโปสเฟียร์มีระดับความสูงประมาณ 1-18 กิโลเมตรเมื่อพิจารณาจากพื้นโลก โดยบริเวณสูงสุดของชั้นเรียกว่าโทรโปพอส (Tropopause) ทั้งนี้ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์จะผกผันกับระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 6.5° เซลเซียสต่อกิโลเมตร ซึ่งที่พื้นผิวโลกเป็นบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตนอกจากนี้ภายในระดับชั้นโทรโปสเฟียร์จะประกอบไปด้วยก๊าซชนิดต่างๆ รวมไปถึงฝุ่นละออง และสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น ไอน้ำ หมอก คิว และหิมะ [18]

ชั้นสตราโตสเฟียร์เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นโทรโปสเฟียร์ ที่ชั้นนี้บริเวณขอบด้านล่างจะมีอุณหภูมิที่คงที่และมีความหนาหลายกิโลเมตรซึ่งเรียกว่าชั้นไอโซเทอร์มอล (Isothermal layer) โดยบริเวณดังกล่าวจะมีระดับความสูงที่ประมาณ 20 กิโลเมตร ที่บริเวณสูงขึ้นไปอุณหภูมิก็จะสูงตามจนกระทั่งถึงบริเวณขอบบนของชั้นสตราโตสเฟียร์ที่ความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร เรียกว่าสตราโตพอส (Stratopause) จะมีอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิต่ำพื้นผิวโลก ภายในชั้นบรรยากาศบริเวณนี้ จะไม่มีความแปรปรวนของสภาพอากาศเนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดในบริเวณส่วนบนสูงกว่าอุณหภูมิของบริเวณส่วนล่างของชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์จึงไม่เกิดการยกตัวของอากาศ และภายในชั้นดังกล่าวแทบจะไม่มีไอน้ำอยู่ทำให้ปราศจากเมฆและฝนซึ่งดีต่อทัศนวิสัยในการบินแต่ในบางโอกาสที่ตำแหน่งละติจูดกลางและละติจูดสูงอาจพบเมฆมุก (Mother of pearl cloud หรือ Nacreous cloud) ในระดับความสูงประมาณ 20-30 กิโลเมตร นอกจากนี้รังสีที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์จะถูกดูดซับด้วยก๊าซไอโซนภายในชั้นนี้ [18]

ชั้นมิโซสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ถัดจากชั้นสตราโตสเฟียร์ มีระดับความสูงอยู่ที่ประมาณ 50-80 กิโลเมตร อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเหนือบริเวณสตราโตพอสจะมีอุณหภูมิสูงและลดลงไปตามความสูงจนกระทั่งถึงบริเวณขอบบนของชั้นที่มีอุณหภูมิต่ำสุดเรียกว่ามีโซพอส (Mesopause) ซึ่งอาจลดลงต่ำถึงลบ 100 องศาเซลเซียส ด้วยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศที่ต่ำทำให้อุณหภูมิกลายเป็นผลึกน้ำแข็งกลายเป็นเมฆในลักษณะพิเศษเรียกว่าเมฆเรืองแสง (Noctilucent cloud) จากลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศทั้ง 3 ชั้นที่กล่าวมา องค์ประกอบของก๊าซต่างๆที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศมีอัตราส่วนที่ค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจากลักษณะดังกล่าวจึงเรียกชั้นบรรยากาศทั้ง 3 ชั้นรวมกันว่าชั้นโฮโมสเฟียร์ (Homosphere หรือ Homogeneous atmosphere) [18]

ชั้นเทอร์โมสเฟียร์เป็นชั้นที่อยู่เหนือบริเวณมีโซพอสขึ้นไปถึงระดับความสูงประมาณ 800 กิโลเมตรจากผิวโลก อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชั้นนี้จะเพิ่มขึ้นตามความสูงเนื่องจากความหนาแน่นอากาศมีน้อย ทั้งนี้ระดับความสูงของชั้นเทอร์โมสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของปฏิกิริยาบนดวงอาทิตย์ กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์มีความรุนแรงมากก็จะส่งผลให้ชั้นเทอร์โมสเฟียร์มีอุณหภูมิและระดับความสูงที่เพิ่มตามไปด้วยโดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศอาจสูงได้ถึง 1,800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ชั้นบรรยากาศยังสามารถจำแนกได้จากโครงสร้างอื่นเช่น จำแนกตามปริมาณไอออนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีกับรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ภายในชั้นบรรยากาศและเรียกชั้นบรรยากาศดังกล่าวว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยชั้นไอโอโนสเฟียร์มีระดับความสูงที่อยู่ในระดับเดียวกับชั้นเทอร์โมสเฟียร์ และจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เมื่อมีอนุภาคทางไฟฟ้าแผ่จากดวงอาทิตย์เข้ามาปะทะกันประกอบกับอำนาจสนามแม่เหล็กโลกจะทำให้เกิดแสงเหนือ (Aurora borealis) ในแถบบริเวณขั้วโลกเหนือ และแสงใต้ (Aurora australis) ที่เกิดในแถบบริเวณขั้วโลกใต้ โดยการเกิดแสงเหนือและแสงใต้จะอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 90 ถึง 130 กิโลเมตร และจากระดับความสูงของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์พบว่ามีปริมาณอากาศที่เบาบางรวมถึงอัตราส่วนของก๊าซที่ผกผันกับระดับความสูงยกตัวอย่าง เช่น ที่ความสูงตั้งแต่เหนือบริเวณมีโซพอสถึงประมาณ 240 กิโลเมตรจะเป็นบริเวณที่มีองค์ประกอบโมเลกุลของไนโตรเจนและออกซิเจน ถัดขึ้นไปถึงประมาณ 1,000 กิโลเมตรเป็นบริเวณที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนอะตอมเดี่ยว และถัดขึ้นไปถึงประมาณ 2,400 กิโลเมตรเป็นบริเวณที่มีองค์ประกอบของฮีเลียมอะตอมเดี่ยว ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือระดับความสูง 2,400 กิโลเมตรที่ระดับความสูงนี้จะประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมเดี่ยว และจากองค์ประกอบโมเลกุลของก๊าซ

ที่อยู่กระจายตัวตามระดับความสูงที่กล่าวมาเป็นองค์ประกอบที่ต่างกลุ่มกันทำให้บริเวณที่อยู่สูงจากพื้นโลกประมาณ 100 กิโลเมตรขึ้นไปมีชื่อเรียกว่าเฮเทอร์อสเฟียร์ [18]

### 2.1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

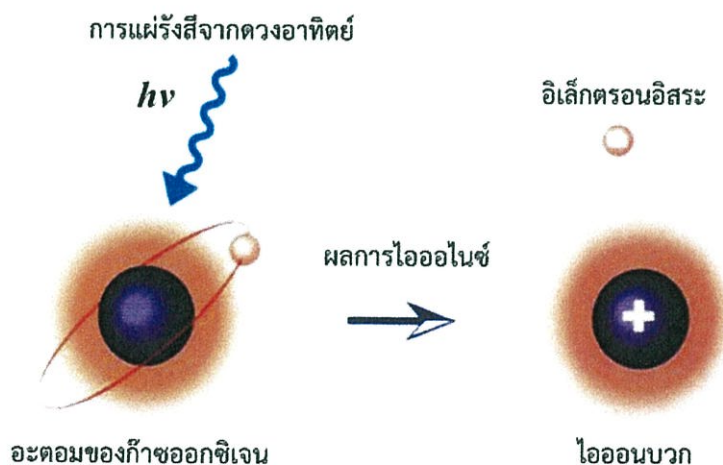
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็คตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์ของกลุ่มพลาสมาก๊าซที่อาศัยอยู่ในชั้นบรรยากาศโดยความหนาแน่นของอิเล็คตรอนที่เกิดขึ้น การไอออไนซ์เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการสะท้อนความถี่คลื่นวิทยุที่ต่ำกว่าย่าน HF สัญญาณดาวเทียมในระบบนำร่องที่ถูกแพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งนี้โดยทั่วไปความหนาแน่นของอิเล็คตรอนภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีปริมาณความหนาแน่นของอิเล็คตรอนประมาณ  $10^{10}$  -  $10^{12}$  หน่วยอิเล็คตรอนต่อเมตรและมีขอบเขตของชั้นบรรยากาศที่ระดับความสูงประมาณ 50 ถึง 2,000 กิโลเมตรจากพื้นโลก [19] นอกจากนี้ที่บริเวณเหนือชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ยังมีโมเลกุลที่เป็นกลางเป็นจำนวนมากและอิเล็คตรอนอาศัยอยู่มีหน้าที่ปกป้องโลกจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากับลมสุริยะ (Solarwind) ซึ่งบริเวณดังกล่าวเรียกว่าชั้นพลาสมาสเฟียร์ (Plasmasphere) หรือโปรโตสเฟียร์ (Protosphere) ทั้งนี้กระบวนการไอออไนเซชันนั้น (Ionization) เกิดขึ้นจากการที่อะตอมของก๊าซออกซิเจน (Atomic oxygen) ทำปฏิกิริยากับแสงอาทิตย์ (Solar EUV flux) ทำให้เกิดการแยกตัวระหว่างไอออนที่มีประจุเป็นบวก (Positive ion) และอิเล็คตรอนอิสระ (Free electron) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะถูกเรียกว่าการไอออไนซ์จากแสงอาทิตย์ (Photo ionization) อย่างไรก็ตามระดับการไอออไนซ์ในแต่ละครั้งจะเกิดไม่เท่ากันทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา ระดับความสูง รวมถึงสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการไอออไนซ์ เช่น ความหนาแน่นของปริมาณพลาสมาก๊าซ ปริมาณการชนกันของอิเล็คตรอนที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ปริมาณรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีคอสมิก (Cosmic) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสีที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในรูปที่ 2.2 แสดงการอธิบายลักษณะการไอออไนซ์ของก๊าซตามสมการที่ 2.1 กล่าวคือเมื่อโมเลกุลของอะตอมของก๊าซออกซิเจน ( $O$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ถูกไอออไนซ์ด้วยโฟตอน ( $h\nu$ ) ที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ทำให้เกิดการแยกตัวออกเป็นไอออนที่มีประจุเป็นบวกของโมเลกุลของอะตอมออกซิเจน และอิเล็คตรอนอิสระ (โมเลกุลที่ได้รับอิเล็คตรอนที่ถูกแยกออกไปจากของอะตอมของก๊าซออกซิเจนจะกลายเป็นไอออนที่มีประจุเป็นลบ) ภายใต้แรงทางไฟฟ้า

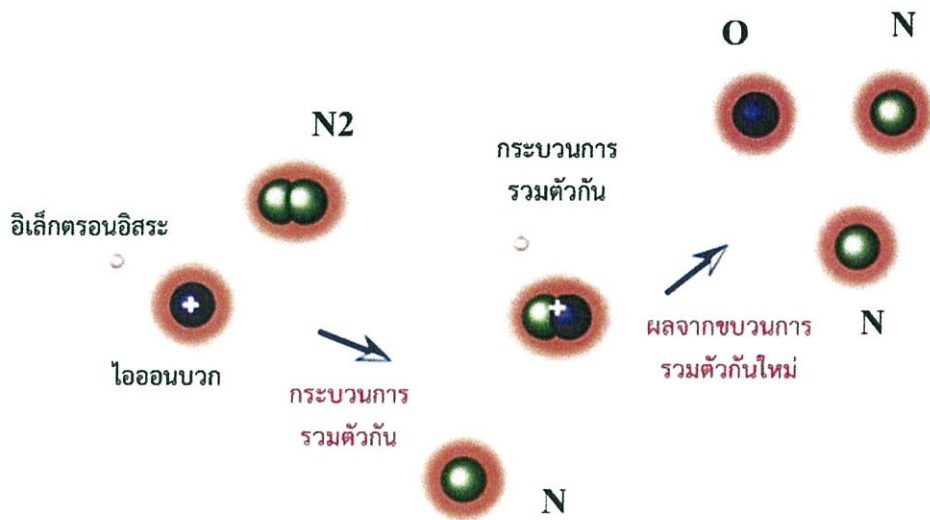
ที่เกิดภายในชั้นบรรยากาศ เช่น แรงแดด หรือ แรงแผลกของโมเลกุลที่มีประจุขั้วที่ต่างกันทำให้อะตอมของก๊าซเคลื่อนตัวอยู่ภายในชั้นบรรยากาศอยู่ตลอดเวลา ซึ่งก็ทำให้เกิดการชนกันของทั้งไอออนและอิเล็กตรอนทำให้เกิดการรวมตัวกันใหม่ (Process of combination) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา โดยในรูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการรวมตัวกันของโมเลกุลในชั้นบรรยากาศ



ทำนองเดียวกันในรูปที่ 2.3 การชนกันระหว่างไอออนกับโมเลกุลที่มีสถานะเป็นกลางของก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานหรือเกิดการแลกเปลี่ยนประจุและเมื่อเกิดการรวมตัวกันใหม่กับอิเล็กตรอนจะทำให้โมเลกุลของออกซิเจนและไนโตรเจนกลับมาสู่สถานะที่เป็นกลางคือไม่มีขั้วทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.2) และ (2.3)



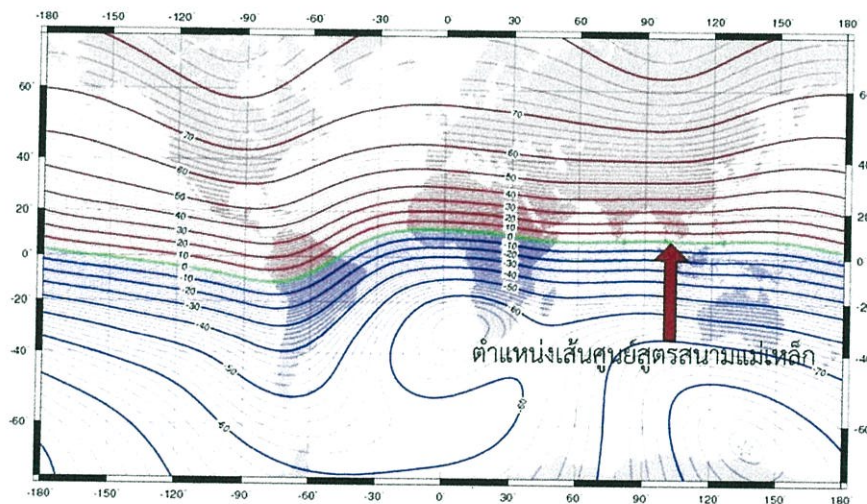
รูปที่ 2.2 กระบวนการไอออไนเซชัน [20]



รูปที่ 2.3 กระบวนการรวมตัวกันของโมเลกุลในชั้นบรรยากาศ [20]

เนื่องจากโมเลกุลหนึ่งโมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์จะมีการถ่ายโอนพลังงานหรือแลกเปลี่ยนประจุอยู่ตลอดเวลาซึ่งเกิดจากการปะทะกันของโมเลกุล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่มีสภาวะความกดดันของชั้นบรรยากาศสูงทำให้มีการชนกันของอนุภาคบ่อยครั้งส่งผลให้มีโอกาสเกิดการรวมตัวกันของโมเลกุลมากตามไปด้วย ดังนั้นโมเลกุลของอะตอมก๊าซออกซิเจนอาจจะคงอยู่ในสภาวะที่เป็นอนุภาคเพียงระยะเวลาสั้นๆ เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นบรรยากาศที่อยู่ในระดับที่สูงกว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ นอกจากนี้ที่บริเวณเหนือชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ยังดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้ที่ระดับความสูงต่ำกว่า 50 กิโลเมตรมีปริมาณการไอออไนซ์น้อย ในทางกลับกันที่ระดับความสูงมากกว่า 400 กิโลเมตรซึ่งเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของออกซิเจนที่เบาบางทำให้ความหนาแน่นของการไอออไนซ์มีค่าน้อยตามไปด้วยถึงแม้ว่าที่บริเวณดังกล่าวจะได้รับอิทธิพลของรังสีจากดวงอาทิตย์มากก็ตาม ดังนั้นจากที่กล่าวมาที่ระดับความสูงประมาณ 50-400 กิโลเมตรจะเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของกลุ่มอนุภาคออกซิเจนและมีสภาวะความกดดันในชั้นบรรยากาศ ดังนั้นอิทธิพลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์ที่ส่งผลต่อการไอออไนซ์ ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่าที่ความสูงระดับประมาณ 50-400 กิโลเมตรมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าสูงสุด

นอกจากนี้สภาวะภายนอกชั้นบรรยากาศอย่างเช่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ยังสัมพันธ์กับความผกผันของการไอออไนซ์ ทั้งนี้ตำแหน่งมุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่แพร่มายังโลกหรือมุมซีนิธ (Zenith angle) ยังมีผลต่อไอออไนซ์ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศเนื่องจากตำแหน่งมุมซีนิธเป็นมุมในการอ้างอิงตำแหน่งทิศทางของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่แผ่มายังโลก ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ดังนั้นถ้ามุมซีนิธมีค่าน้อยก็ส่งผลทำให้ลำแสงที่แผ่จากดวงอาทิตย์มีระยะทางเข้าใกล้โลกมากขึ้นทำให้มีอัตราการการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งการไอออไนซ์ของชั้นบรรยากาศที่อยู่ในบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กและในบริเวณละติจูดต่ำ โดยลักษณะของแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กจะอยู่ในตำแหน่งที่เลื่อนไปจากตำแหน่งของแกนโลกประมาณ  $12^\circ$  ในรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กและแนวเส้นศูนย์สูตรโลก (บริเวณตำแหน่ง  $0^\circ$  คือเส้นสีเขียว) มีลักษณะแตกต่างกัน



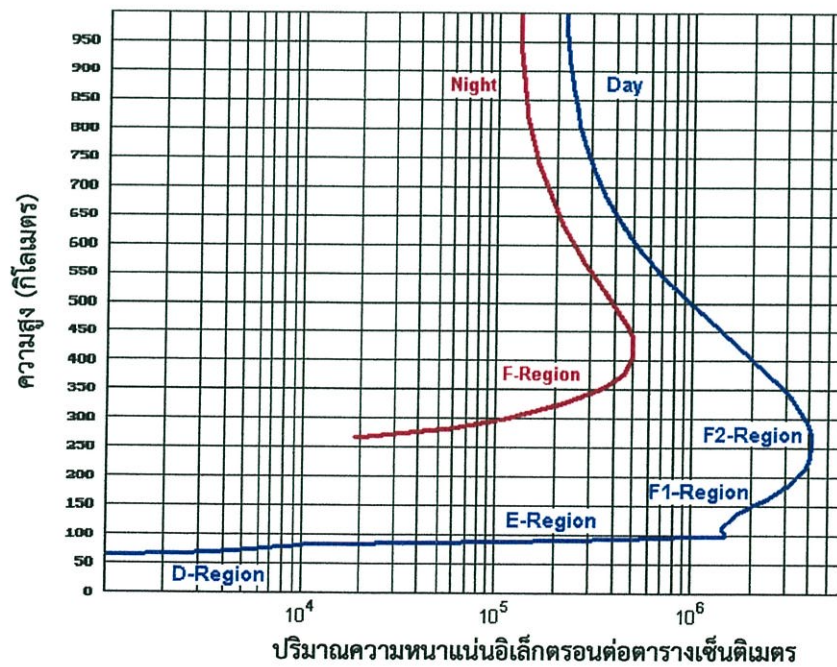
รูปที่ 2.4 แผนที่โลกและตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ [21]

กระบวนการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้เกิดความแตกต่างของอิเล็กตรอนที่เกิดจากองค์ประกอบก๊าซในระดับความสูงต่างๆภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีผลต่อปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่แสดงในรูปที่ 2.5 โดยปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะเห็นว่าในเวลากลางวันชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบ่งตัวออกเป็นชั้น D, E, F1 และ F2 ส่วนในเวลากลางคืนที่ไม่มีแสงจากดวงอาทิตย์เข้ามาทำปฏิกิริยาไอออไนซ์

กับอะตอมก๊าซ ความหนาแน่นของชั้น D จะจางหายไป ส่วนที่ชั้น F1 และ F2 จะรวมตัวกันเหลือเพียงเฉพาะชั้น F เพียงชั้นเดียวทั้งนี้ลักษณะต่างๆของแต่ละชั้นภายในบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถอธิบายได้ ดังนี้

### 2.1.2.1 ชั้น D

เป็นชั้นที่ความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนอาศัยอยู่ต่ำ มีระดับความสูงจากพื้นโลกประมาณ 50-90 กิโลเมตรส่วนมากปรากฏในเวลากลางวัน และจางหายไปในเวลากลางคืนเนื่องจากจำนวนของอนุภาคอิเล็กตรอนและไอออนลดลงโดยที่ในเวลากลางวันซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการไอออไนซ์สูงสุดจะมีความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนประมาณ  $1.5 \times 10^4$  อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร [23] โดยปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ คือ ดูดซับคลื่นความถี่ในช่วง MF, HF และ VHF ที่ถูกส่งผ่านชั้นดังกล่าว นอกจากนี้ยังสามารถสะท้อนความถี่ในช่วง VLF และ LF ดังนั้นในการศึกษาพฤติกรรมของชั้นนี้จะใช้อุปกรณ์วัดมวลที่ติดตั้งบนจรวด (Rocket-borne mass) ที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดปริมาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศ [24]



รูปที่ 2.5 ปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [22]

### 2.1.2.2 ชั้น E

ชั้นอีคือชั้นบรรยากาศบริเวณที่อยู่เหนือชั้นดีขึ้นมา มีระดับความสูงตั้งแต่ 90-140 กิโลเมตร และที่บริเวณนี้ จะมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากที่สุด ในเวลากลางวันที่ระดับความสูงประมาณ 110 กิโลเมตร ซึ่งจะมีปริมาณของอิเล็กตรอนระหว่าง  $10^5$  ถึง  $4.5 \times 10^5$  อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ส่วนในเวลากลางคืน เนื่องจากการไอออไนซ์ภายในบรรยากาศที่น้อยมาก ทำให้ไม่สามารถพิจารณาใช้เทคนิคไอโอโนสเฟียร์วัดสภาพบรรยากาศชั้นนี้ โดยค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้นอีจะแปรผันตามปฏิกิริยาที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามรอบของวัฏจักรสุริยะ และทำให้มีผลกระทบต่อ การสื่อสารในช่วงความถี่ HF ที่อาศัยการสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่ในบางครั้ง ปริมาณการไอออไนซ์ที่ไม่สม่ำเสมอภายในบริเวณชั้นอีอาจก่อให้เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติ ที่เรียกว่าชั้นสปอเรติก-E (Sporadic-E) ซึ่งลักษณะของปรากฏการณ์นี้จะอธิบายเพิ่มเติมให้หัวข้อถัดไป

### 2.1.2.2 ชั้น F

เป็นบริเวณชั้นบนสุดของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และเป็นชั้นที่มีการไอออไนซ์มากที่สุด เมื่อเทียบกับชั้นดีและชั้นอี โดยปริมาณของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์ของชั้น F จะขึ้นอยู่กับ อิทธิพลของแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจายมายังโลกในเวลากลางวัน รวมถึงฤดูกาลต่างๆ ซึ่งชั้น F ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่เหมาะสมต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะไกลได้แม้ในเวลา กลางคืน ส่วนในเวลากลางวันนั้นชั้น F จะแบ่งออกเป็นชั้น F1 และ F2 โดยปรากฏการณ์นี้จะพบตลอดปี ในบริเวณละติจูดต่างๆ ซึ่งระดับความสูงของชั้น F1 ประมาณ 140 ถึง 250 กิโลเมตร และชั้น F2 ซึ่งเป็น ชั้นที่มีปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดจะมีระดับความสูงประมาณ 250 ถึง 400 กิโลเมตร ทั้งนี้ การเปลี่ยนแปลงระดับความสูงและความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้น F จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น เวลา อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศ หรือวัฏจักรสุริยะ เป็นต้น

### 2.1.3 ลักษณะปรากฏการณ์สปอเรติก-E ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

สปอเรติก-E (Es) โดยนิยามแล้วเป็นการไอออไนซ์ที่มีลักษณะกระจัดกระจายตัว อย่างหนาแน่นของอิเล็กตรอน (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนอาจจะมีมากถึง 10 เท่าของชั้นอีปกติ) ที่เวลาใดๆ ในระดับความสูงประมาณ 90-120 กิโลเมตร ซึ่งเป็นความสูงระดับเดียวกับชั้นอีของบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ที่ปกคลุมไปทั่วโลก โดยทั่วไปปรากฏการณ์สปอเรติก-E ไม่สามารถทำนายการเกิดได้

เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์ของชั้นดังกล่าวไม่สัมพันธ์กับค่าปฏิบัติการที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์โดยพื้นฐานแล้วปรากฏการณ์สปอเรติก-E ที่ถูกศึกษาด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด จะอาศัยการส่งพัลส์ความถี่แพร่กระจายขึ้นไปวัดสภาพชั้นบรรยากาศโดยพัลส์ความถี่ที่รับกลับมา จะถูกประมวลผลและแสดงเป็นภาพไอโอโนแกรม ซึ่งปรากฏการณ์นี้มีความสำคัญและน่าสนใจเนื่องจากเป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณขนาดเล็ก เพียงไม่กี่กิโลเมตรจนกระทั่งแผ่ขยายไปถึงหลายร้อยกิโลเมตร (small-scale irregularity) ซึ่งมีสาเหตุมาจากกระบวนการยกตัวของชั้นบรรยากาศทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศที่กระจายตัว ไม่สม่ำเสมอ (gradient drift process) [10] โดยปริมาณอิเล็กตรอนที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมอในชั้นไอโอโนสเฟียร์มีผลมาจากความหนาแน่นขององค์ประกอบพลาสมาในชั้นบรรยากาศ บริเวณที่ทำการพิจารณาและองค์ประกอบพลาสมาบริเวณรอบข้างเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการยกตัวที่มีความผิดปกติของชั้นบรรยากาศด้วยความเร็วตามสมการที่ (2.4) [1]

$$\delta V = \frac{\delta E \times B_0}{|B_0|^2} \quad (2.4)$$

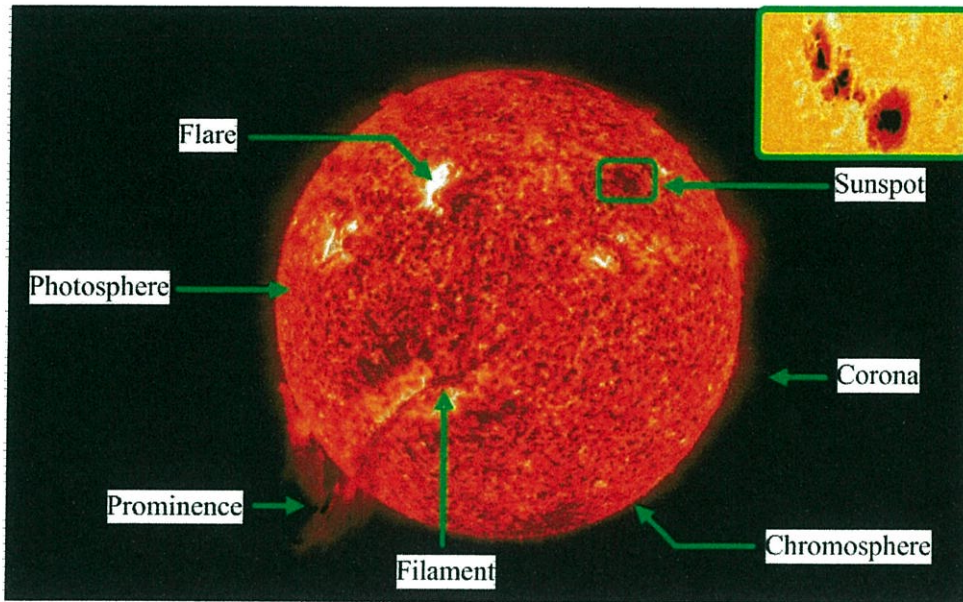
จากสมการที่ 2.4 ความเร็วในการยกตัวของชั้นบรรยากาศแทนด้วย  $\delta V$  เปลี่ยนแปลงไปตาม ส่วนต่างของสนามไฟฟ้า ( $\delta E$ ) ที่เปลี่ยนแปลงในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก ( $B_0$ ) ซึ่งเมื่อพิจารณา การยกตัวของชั้นบรรยากาศกับลักษณะการเกิดปรากฏการณ์สปอเรติก-E ประเภทคิว (q type) ที่เกิดจากการรวมตัวของกลุ่มอิเล็กตรอนที่ไม่สม่ำเสมอบริเวณชั้นไอ โดยพิจารณาจากค่าความถี่วิกฤติ ของชั้นสปอเรติก-E ประเภทคิวที่แสดงอยู่บนไอโอโนแกรมที่เกิดในบริเวณใกล้แนวเส้นศูนย์สูตร สนามแม่เหล็กโลกจะพบว่าลักษณะดังกล่าวมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งการวิเคราะห์ลักษณะการเกิด ชั้นสปอเรติก-E ประเภทคิวสามารถพิจารณา ดังนี้ [11]

1. เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะเวลากลางวันในบริเวณที่อยู่เหนือและต่ำลงไป จากแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กประมาณ 15 องศา
2. บางครั้งชั้นสปอเรติก-E จะไม่บังการสะท้อนของคลื่นวิทยุที่ถูกแพร่กระจายออกไป วัดสภาพชั้นบรรยากาศทั้งหมด แต่จะทำให้คลื่นวิทยุบางส่วนสามารถแทรกผ่านไปยังสะท้อนบริเวณ ชั้นที่อยู่สูงกว่าได้
3. สปอเรติก-E เป็นชั้นที่อยู่ต่ำสุดแม้ว่าจะมีลักษณะการสะท้อนและการกระจายตัว แบบเดียวกันในระดับที่อยู่สูงขึ้นไป

4. ในกรณีที่เกิดชั้นสเปกตรัม-E ที่ไม่รุนแรงจะเห็นจุดสุดท้ายที่เป็นค่าความถี่วิกฤติของชั้น E และเป็นบริเวณเริ่มต้นของการเกิดชั้นสเปกตรัม-E
5. โดยทั่วไปปรากฏการณ์สเปกตรัม-E ประเภทนี้จะไม่เกิดขึ้นหลายชั้น
6. ความถี่วิกฤติสูงสุดของชั้นสเปกตรัม-E สามารถแผ่ขยายได้มากกว่า 13 เมกะเฮิรตซ์

## 2.2 อิทธิพลจากปฏิกิริยาที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์

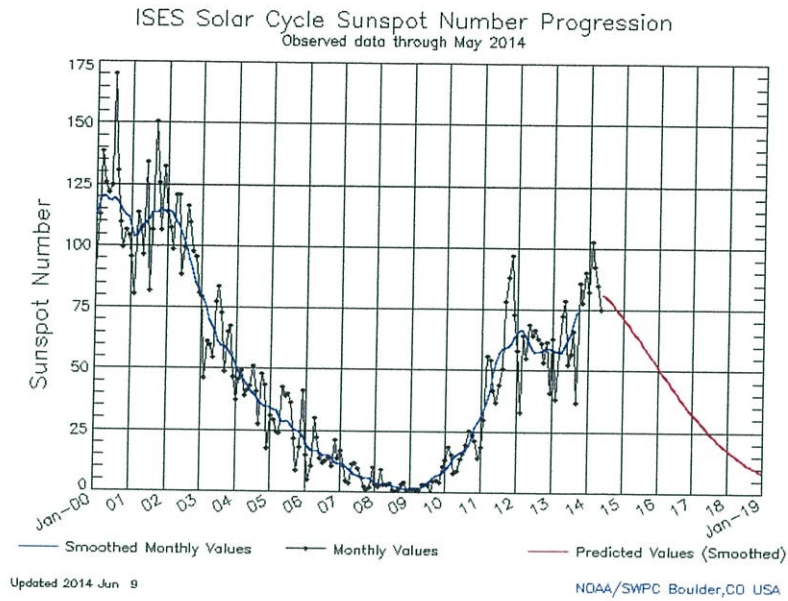
ลักษณะทั่วไปของดวงอาทิตย์ในมุมมองทางดาราศาสตร์ได้อธิบายว่า ดวงอาทิตย์เป็นดาวขนาดกลางที่มีรัศมีประมาณ 696,000 กิโลเมตรและมีอุณหภูมิความร้อนบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ประมาณ 5,800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ดวงอาทิตย์ยังประกอบไปด้วย ไฮโดรเจน 92.1% ฮีเลียม 7.8% ออกซิเจน 0.06% คาร์บอน 0.03% และองค์ประกอบอื่นๆอีกประมาณ 0.01% จากโครงสร้างและองค์ประกอบของดวงอาทิตย์สามารถจำแนกเป็นบริเวณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 เช่น โฟโตสเฟียร์ (Photosphere) คือ ผิวของดวงอาทิตย์ โครโมสเฟียร์ (Chromosphere) คือ บรรยากาศชั้นล่างสุดของดวงอาทิตย์ และโคโรนา (Corona) คือ บรรยากาศชั้นบนสุดของดวงอาทิตย์ โดยทั่วไปแล้วพื้นผิวของดวงอาทิตย์นั้นเกิดจากการรวมตัวกันของกลุ่มก๊าซต่างๆ ซึ่งมีลักษณะต่างจากพื้นผิวของโลก ซึ่งกลุ่มก๊าซที่เคลื่อนตัวอยู่บนดวงอาทิตย์บริเวณต่างๆ นั้นมีความหนาแน่นของพลังงานและความร้อนที่เป็นองค์ประกอบเกิดขึ้นที่บริเวณต่างๆ ไม่เท่ากันทำให้บางพื้นที่บนบริเวณพื้นผิวของดวงอาทิตย์เห็นเป็นบริเวณจุดมืดดับ (Sunspot) เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง ทั้งนี้จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับวัฏจักรสุริยะ (Solar cycle) ที่มีรอบการเปลี่ยนแปลงทุก 11 ปี โดยจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงไปตามรอบวัฏจักรสุริยะจะมีอิทธิพลต่อการไอออไนซ์ของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และส่งผลทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสื่อสารที่มีชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นช่องสัญญาณที่เป็นตัวกลางสำหรับส่งผ่านคลื่นความถี่ที่ใช้สื่อสาร เช่น การส่งวิทยุคลื่นสั้น หรือสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ระบบระบุตำแหน่ง (Global Positioning System หรือ GPS) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและลักษณะของดวงอาทิตย์ [25]

### 2.2.1 จุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot)

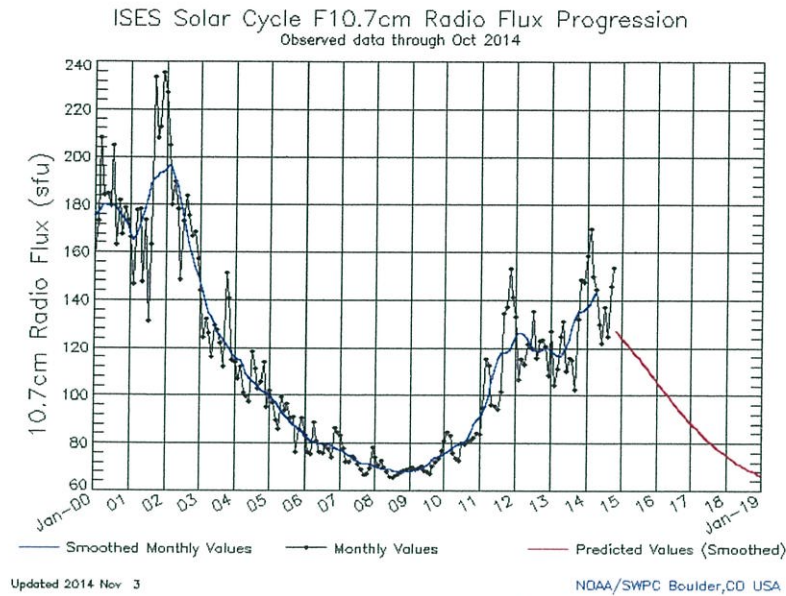
จุดดับบนดวงอาทิตย์เป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณโดยรอบที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของดวงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิที่บริเวณจุดดับอาจลดลงไปถึงประมาณ 3,000 องศาเซลเซียส การเกิดจุดดับบนดวงอาทิตย์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ที่น่าสนใจ ทั้งนี้การเกิดจุดดับและการหายไปของจุดดับบนดวงอาทิตย์มีเวลาที่ไม่แน่นอนกล่าวคือการเกิดจุดดับอาจเกิดขึ้นนาน 2-3 วันก่อนที่จะหายไป หรืออาจเกิดขึ้นนาน 4-5 รอบวัฏจักรของดวงอาทิตย์ (หนึ่งรอบวัฏจักรของดวงอาทิตย์ใช้เวลาประมาณ 27 วัน) เหตุผลที่ทำให้จุดดับบนดวงอาทิตย์เป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจเนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สูงถึง 0.4 เทสลา (4,000G) มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณพลาสมาภายในดวงอาทิตย์ทำให้เกิดการลุกไหม้บนพื้นผิวของดวงอาทิตย์ (flare) ไยสุริยะ (filament) และเปลวสุริยะ (prominence) โดยในรูปที่ 2.6 ไยสุริยะคือบริเวณที่มีลักษณะเป็นเส้นมืดดับบนพื้นผิวดวงอาทิตย์มีความยาวตั้งแต่หลายหมื่นกิโลเมตรหรือหนึ่งแสนกิโลเมตรซึ่งไยสุริยะเป็นแนวการเคลื่อนที่ของเปลวสุริยะจากการปะทุตัวขึ้นของเปลวสุริยะทำให้เกิดการไอออไนซ์ของพลาสมาบนดวงอาทิตย์ รวมถึงทำให้รังสีเอ็กซ์ (X-ray) และสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์ผ่านชั้นโคโรลาออกไปในอวกาศและถูกพัดพาไปตามลมสุริยะ (solar wind)



รูปที่ 2.7 แนวโน้มของวัฏจักรสุริยะและจุดดับบนดวงอาทิตย์ตั้งแต่ค.ศ. 2000 ถึงค.ศ. 2019 [26]

### 2.2.2 สัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตร (Radio noise flux 10.7cm.)

สัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรหรือความถี่ 2,800 เมกะเฮิรตซ์ เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสัมพันธ์กับจุดดับและถูกปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยความยาวคลื่นดังกล่าว เป็นผลจากการศึกษาดัชนีที่แพร่กระจายมาจากดวงอาทิตย์ของสภาการวิจัยแห่งชาติของประเทศแคนาดา ที่ตั้งอยู่ในเมืองออตตาวา (National Research Council of Canada, Ottawa) และได้ถูกนำเสนอ ครั้งแรกในปีค.ศ. 1947 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาดวงอาทิตย์และคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรมีอิทธิพลต่อการกระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และนอกจากนี้ดัชนีสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรยังเป็นตัวแปรที่นำไปพิจารณาเพื่อใช้ทำนายค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [27]



รูปที่ 2.8 แนวโน้มดัชนีคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรตั้งแต่ปีค.ศ. 2000 ถึงค.ศ. 2019 [28]

### 2.3 ฤดูกาล

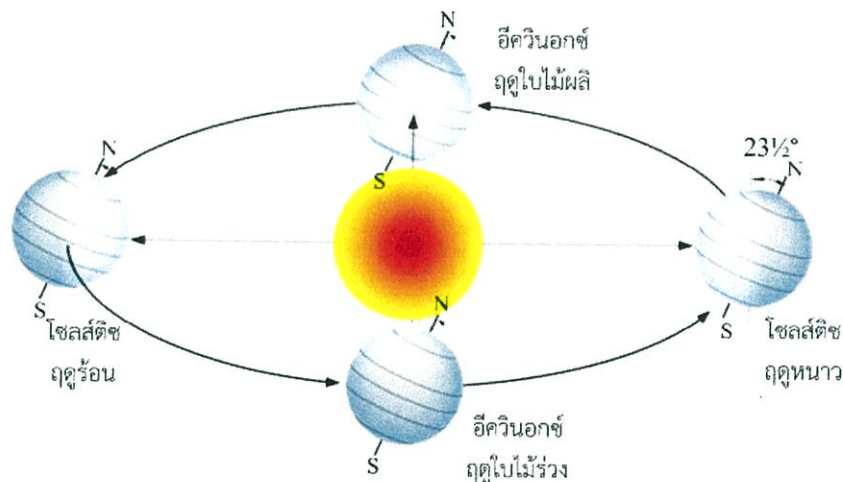
ตำแหน่งของการตกกระทบของแสงอาทิตย์ที่แผ่มายังโลกในช่วงเวลาตลอดทั้งปีขึ้นอยู่กับแนวแกนโลกที่เอียงทำมุมกับดวงอาทิตย์ประมาณ  $23\frac{1}{2}^{\circ}$  ซึ่งการตกกระทบของแสงอาทิตย์ที่แผ่มายังโลกมีผลกระทบอย่างมากกับสนามแม่เหล็กโลก และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งตามปฏิทินทั่วไปใน 1 ปีจะประกอบด้วยเดือนทั้งหมด 12 เดือนแต่ในการพิจารณาผลกระทบที่พิจารณาจากค่าเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละปีก็ไม่เพียงพอสำหรับการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตลอดทั้งปีของปริมาณรังสี และคลื่นแม่เหล็กที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ทำให้ชั้นบรรยากาศโลกเกิดความแปรปรวนเนื่องจากการไอออไนซ์ ในรูปที่ 2.9 แสดงการแบ่งฤดูโดยพิจารณาจากบริเวณที่แสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบมาบนโลก ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 ฤดูได้แก่

1. March equinox หรือช่วงอิควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ คือ ช่วงเดือนมีนาคมและเดือนเมษายน ในฤดูดังกล่าวลำแสงจากดวงอาทิตย์จะตกกระทบมายังโลกในตำแหน่งตั้งฉากกับเส้นศูนย์สูตรโลก ทำให้ในบริเวณดังกล่าวมีเวลากลางวันและกลางคืนเท่ากัน

2. June solstice หรือช่วงโซลส์ติซฤดูร้อน คือ ช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม ในฤดูดังกล่าวแสงจากดวงอาทิตย์จะตกกระทบตั้งฉากในบริเวณเส้นละติจูดที่  $23.5^{\circ}$  เหนือเส้นศูนย์สูตรทำให้ในช่วงกลางวันมีเวลามากกว่ากลางคืน

3. September equinox หรือช่วงอีควินอกซ์ฤดูใบไม้ร่วง คือ ช่วงเดือนกันยายนและเดือนตุลาคม มีช่วงเวลากลางวันกลางคืนเท่ากันเหมือนช่วงอีควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ

4. December solstice หรือช่วงโซลส์ติซฤดูหนาว คือ ช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ ในฤดูดังกล่าวแสงจากดวงอาทิตย์จะตกกระทบตั้งฉากในบริเวณเส้นละติจูดที่  $23.5^{\circ}$  ใต้เส้นศูนย์สูตรทำให้ในช่วงกลางคืนมีเวลามากกว่ากลางวัน [29,30]



รูปที่ 2.9 การแบ่งฤดูโดยพิจารณาตามระนาบการตกกระทบของลำแสงจากดวงอาทิตย์ [31]

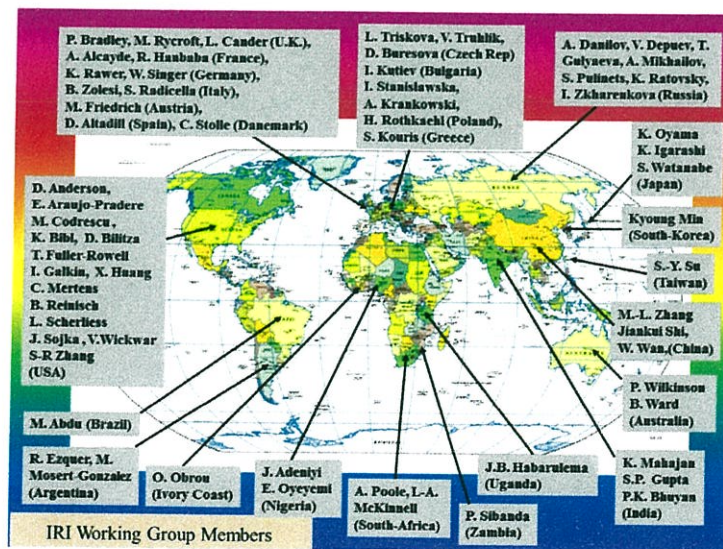
## 2.4 แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (International Reference Ionosphere : IRI model)

แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (International Reference Ionosphere) หรือแบบจำลอง IRI ได้ถูกก่อตั้งขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1968 ซึ่ง IRI เป็นโครงการระดับนานาชาติที่เกิดจากความร่วมมือระหว่างคณะกรรมการการวิจัยด้านอวกาศ (Committee on Space Research) หรือ COSPAR และสมาคมการวิจัยวิทยาศาสตร์ด้านการสื่อสารนานาชาติ (International Union of Radio Science) หรือ URSI ซึ่งโครงการดังกล่าวมีลักษณะการดำเนินงานเพื่อทำการรวบรวมข้อมูลและ

ศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์และปัจจัยจากอวกาศที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์ [32] โดยมีวัตถุประสงค์ของโครงการ คือ

1. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองเพื่อใช้ในการทำนายค่าตัวแปรต่างๆ ภายในชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์ เช่น ความหนาแน่นอิเล็กตรอน ไอออน, อุณหภูมิ และอัตราความเร็วในการเคลื่อนตัวของชั้นบรรยากาศ เป็นต้น
2. เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลภายในเครือข่ายการวิจัยและทำการเปรียบเทียบลักษณะข้อมูลจากการวัดสภาพชั้นบรรยากาศในบริเวณต่างๆ เพื่อนำไปใช้ปรับปรุงแบบจำลองให้มีความน่าเชื่อถือ
3. เพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้ทันสมัยอยู่ตลอดเวลา โดยแก้ไขให้มีความถูกต้องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดสภาพชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์อย่างต่อเนื่อง
4. เพื่อแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ที่เกิดจากความร่วมมือระหว่าง COSPAR และ URSI ซึ่งแต่เดิม COSPAR เป็นองค์กรที่ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอวกาศ ส่วน URSI เป็นองค์กรที่ทำการศึกษเกี่ยวกับสภาพชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์ที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

นอกจากนี้โครงการ IRI นี้ประกอบไปด้วยผู้เชี่ยวชาญขององค์กร COSPAR และ URSI ที่อาศัยอยู่ในประเทศต่างๆที่แสดงเป็นรายชื่อและบริเวณที่ทำการศึกษา (ในรูปที่ 2.10) ซึ่งในปัจจุบัน IRI ประกอบด้วยนักวิจัยจาก 61 คณะทำงานที่ทำการศึกษาวิจัยสภาพชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์ นับตั้งแต่อดีตที่เริ่มก่อตั้งโครงการ IRI จนกระทั่งถึงปัจจุบันมีเหตุการณ์สำคัญมากมายที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.10 รายชื่อสมาชิกคณะทำงานวิจัยจากทั่วโลกของโครงการแบบจำลอง IRI [35]

ตารางที่ 2.1 เหตุการณ์สำคัญเกี่ยวกับโครงการแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์  
[33]

ปี	เหตุการณ์สำคัญ	รายละเอียด	ฐานข้อมูล
1968	คณะกรรมการ IRI ถูกก่อตั้งโดย COSPAR	ในขณะนั้น Karl Rawer ดำรงตำแหน่งประธานคณะกรรมการ โดยศึกษาผลกระทบจากอวกาศต่อชั้นบรรยากาศ	
1969	URSI เข้ามาร่วมทำโครงการ IRI	ศึกษาผลกระทบจากชั้นบรรยากาศที่มีผลต่อการสื่อสารภาคพื้นดิน	
1975	Karl Rawer และคณะสร้างตารางแบบจำลอง IRI-75 [34]	แสดงค่าตัวแปรในบริเวณละติจูดต่ำ และละติจูดกลาง	ไอโอโนโซนด์, ICS, AEROS
1978	URSI จัดทำรายงานพิเศษเกี่ยวกับแบบจำลอง IRI-79 [35]	ใช้แผนที่ CCIR แสดงค่าตัวแปรสูงสุดสำหรับค่า foE, foF1 และ foF2	โครงข่ายข้อมูลไอโอโนโซนด์จากทั่วโลก
1981	แบบจำลอง IRI-79ถูกรายงานไปยังศูนย์กลางข้อมูลทั่วโลก [36]		
1986	จัดทำแบบจำลอง IRI-86 ลงบนแผ่นดิสก์สำหรับใช้งานบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล [37]	-แก้ไขค่าอิเล็กตรอนที่ตำแหน่งละติจูดต่ำ -แก้ไขแบบจำลอง Te และ Ti	AEROS-A,-B, AE-C,-D,-E, ISI-1,-2, ICS data
1990	แบบจำลอง IRI ถูกรายงานไปยัง National Space Science Data Center (NSSDC) [34]	-รายงานแผนที่ของ foF2 -แก้ไขแบบจำลองค่าอิเล็กตรอนของชั้น E	-ข้อมูลไอโอโนโซนด์จากทั่วโลก -ข้อมูลจาก ICS
1995	เปิดให้บริการแบบจำลอง IRI-95 แบบออนไลน์ [38]	แก้ไขข้อมูลในบริเวณละติจูดต่ำ	ข้อมูลจาก DE-2
1999	การลงมติของ URSI	IRI ได้รับการยอมรับเป็นแบบจำลองมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์	

## ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ปี	เหตุการณ์สำคัญ	รายละเอียด	ฐานข้อมูล
2001	แบบจำลอง IRI-2001 ถูกพัฒนา [39]	-เพิ่ม 2 ทางเลือกสำหรับการคำนวณ อิเล็กตรอนชั้น D -แก้ไขแบบจำลองชั้น F1 และตัวแปร B0 และ B1 -แบบจำลองของพายุสุริยะ -แบบจำลองใหม่ของ Te	-Rocket compilations -โครงข่ายไอโอโนสเฟียร์ -เวลาการเกิดพายุสุริยะ จากข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ -Intercosmos 19, 24, 25
2007	แบบจำลอง IRI-2007 ถูกพัฒนา [40]	-เพิ่ม 2 ทางเลือกสำหรับการคำนวณ อิเล็กตรอนชั้นบนสุด -เพิ่มแบบจำลองขององค์ประกอบไอออน -เพิ่มแบบจำลองการเกิดการแพร่กระจายของชั้น F	-TS: Alouette 1, 2, ISIS 1, 2 -AE-C, -E, Intercosmos 24 -ข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้เหนือประเทศบราซิล

แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ดังนี้

1) เป็นแบบจำลองมาตรฐานสำหรับประยุกต์ใช้งานด้านวิศวกรรม

-ใช้เป็นมาตรฐานในองค์การ NASA

-เป็นมาตรฐานสำหรับพิจารณาผลกระทบของความซับซ้อนภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในหนังสือคู่มือระบบวิศวกรรมของ The European Cooperation for Space Standardization (ECSS, 1997)

-ตัวแปรต่างๆภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการพิจารณาภายใต้มาตรฐาน ISO

-เป็นข้อมูลอ้างอิงที่ใช้ใน ESA/ESTEC ของ Space Environment Information System (SPENVIS) และในเว็บไซต์ MSFC ของ Space Environment Effect (SEE)

2) เป็นเครื่องมือสำหรับการประยุกต์สำหรับการศึกษาพฤติกรรมชั้นบรรยากาศ

-ใช้ศึกษาปริมาณความหนาแน่นรวมของอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศ (Total Electron Content : TEC)

-ความหนาแน่นอิเล็กตรอนถูกแสดงเป็นภาพ 3 มิติของ AVS (Watari และคณะ, 2003)

- 3) เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับชุดเซตผลกระทบที่มีต่อสัญญาณดาวเทียม
- ใช้ข้อมูลสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถวัดจากสถานีต่างๆจากทั่วโลกนำมาใช้เป็นพื้นฐานสำหรับปรับปรุงแบบจำลอง(Bilitza และคณะ, 1997)
  - ข้อมูลลูกบັນทิกในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ได้ทันที (ERS)
  - นำไปใช้ประมวลผลร่วมกับข้อมูล Geosat Follow on (GFO) (Zhang และคณะ, 2002)
- 4) เป็นเครื่องมือสำหรับการประมาณค่าตัวแปรภายในชั้นบรรยากาศเพื่อการตัดสินใจใช้ช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสาร
- ใช้เปรียบเทียบค่า TEC ที่คำนวณจากดาวเทียม GPS
  - ใช้ในการวิเคราะห์ TEC ร่วมกับการวัดของ NNSS (Ciraolo และ Spalla, 2002)
  - นำไปใช้ทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการ Tomographic

## 2.5 เทคนิคไอโอโนโซนด

เมื่อประมาณหนึ่งศตวรรษที่ผ่านมามนุษยพยายามทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ จึงได้พัฒนาเครื่องมือวัดสำหรับใช้ตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศเพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเทคนิคไอโอโนโซนด (Ionosonde) เป็นวิธีการวัดรูปแบบหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการนำมาใช้ศึกษาสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากที่กล่าวมาเทคนิคไอโอโนโซนดนั้นมีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง โดยพบหลักฐานว่าเริ่มแรกมีการศึกษาสภาพชั้นบรรยากาศในลักษณะเดียวกับวิธีการของเทคนิคไอโอโนโซนดที่สถานีสังเกตการณ์ในประเทศอังกฤษ ต่อมาในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 วิธีดังกล่าวถูกใช้สำหรับวิเคราะห์ความถี่ที่เหมาะสมต่อการสื่อสารแบบวิทยุคลื่นสั้น และถูกพัฒนาและสร้างเป็นระบบไอโอโนโซนดโดย Berkner และคณะ [41] ซึ่งได้นำแนวคิดของ Gilliland ที่มีการเพิ่มในส่วนของการออสซิลเลททางความถี่เข้าไปที่เครื่องส่งและเครื่องรับ โดยความถี่ที่ออสซิลเลทในเครื่องส่งจะถูกนำไปผสมกับพัลส์ที่เป็นความถี่ IF (Intermediate Frequency) ก่อนส่งออกไป ส่วนสัญญาณที่ส่งมาถึงเครื่องรับจะถูกนำไปหักล้างกับความถี่ออสซิลเลทของเครื่องรับเพื่อให้เหลือเพียงความถี่ IF เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และอธิบาย

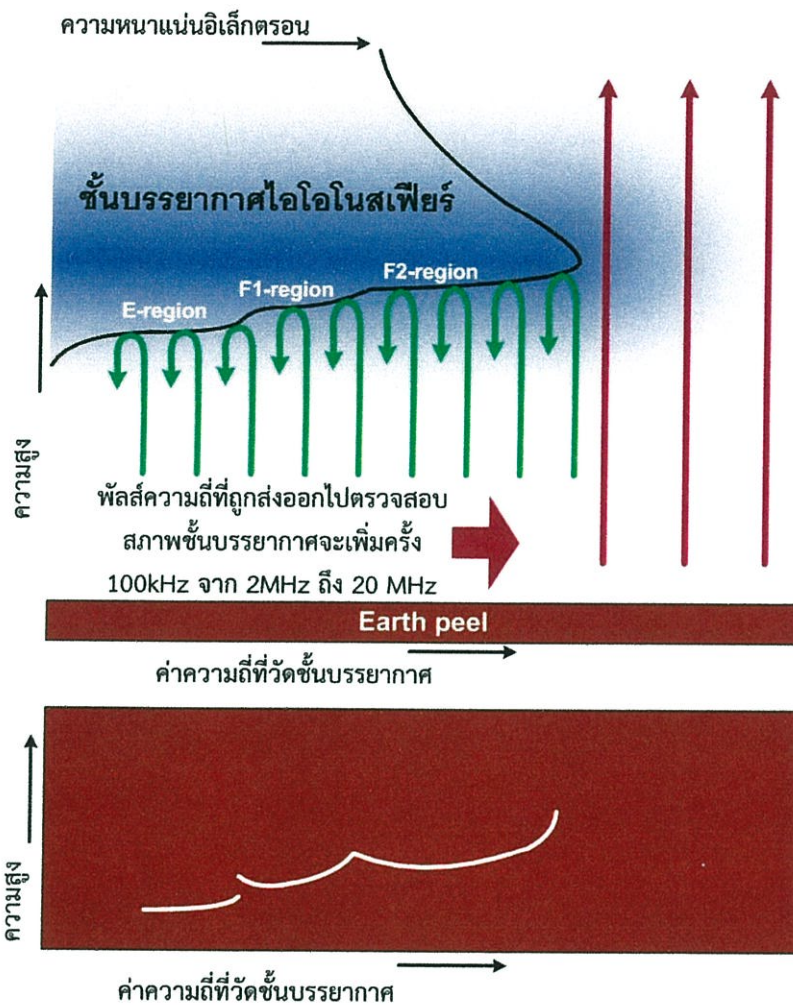
สภาพชั้นบรรยากาศที่สามารถวัดได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าสงครามโลกจะสิ้นสุดลงแต่การใช้เทคนิคไอโอโนโซนดเพื่อศึกษาสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ยังคงถูกพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน

เทคนิคไอโอโนโซนดหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Ionospheric sounder เป็นเทคนิคดั้งเดิมที่ใช้ในการตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ปัจจุบันเทคนิคนี้ยังคงใช้งานอย่างกว้างขวางโดยมีหลักการทำงานคล้ายกับเรดาร์ (RADAR) กล่าวคือ เมื่อคลื่นที่ถูกส่งออกไปสะท้อนกับวัตถุด้วยระยะเวลาใดๆ จะทำให้ทราบว่ามีวัตถุอยู่นั้นอยู่ห่างจากจุดที่ส่งคลื่นเป็นระยะทางเท่าใดจากการคำนวณเวลาที่คลื่นเดินทางออกไปแล้วสะท้อนกลับมา ในทำนองเดียวกันการวัดสภาพชั้นบรรยากาศนั้นเทคนิคไอโอโนโซนดจะส่งพัลส์ความถี่ที่มีค่าอยู่ในช่วง 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ออกไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแนวตั้ง โดยความถี่ที่ส่งออกไปจะเพิ่มขึ้นตามอัตราที่กำหนดไว้อย่างต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.11 (บน) เส้นสีเขียวคือข้อมูลความถี่ที่สามารถวัดได้จากชั้นบรรยากาศและจะถูกนำไปประมวลผลเพื่อแสดงเป็นตัวแปรบนภาพไอโอโนแกรมดังรูป 2.11 (ล่าง)

จากภาพไอโอโนแกรมที่เห็นในรูป 2.11 (ล่าง) ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถคำนวณได้จากเวลาเดินทางของคลื่นที่สะท้อนกลุ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยคลื่นวิทยุที่ถูกส่งออกไปจะมีลักษณะเป็นพัลส์ความถี่ที่ถูกมอดูเลตและส่งออกอย่างต่อเนื่อง (Frequency modulated-continuous wave) ในช่วง 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ดังนั้น ในการคำนวณความสูงสามารถพิจารณาได้ตามสมการที่ (2.6)

$$h' = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad \text{กิโลเมตร} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6)  $h'$  คือความสูงของชั้นบรรยากาศ ส่วน  $c$  คือความเร็วแสงมีค่า  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาทีและ  $\Delta t$  คือผลต่างทางเวลาที่คลื่นวิทยุถูกส่งออกไปวัดชั้นบรรยากาศแล้วสะท้อนกลับมา ทั้งนี้ปัจจัยของการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของระดับความสูง ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจสอบชั้นบรรยากาศปฏิกิริยาที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรสุริยะที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออไนซ์ ซึ่งมีผลต่อความถี่สุดท้ายที่สามารถสะท้อนภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ดังสมการที่ (2.7) [50]



รูปที่ 2.11 ลักษณะการวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด [41]

$$foF_2 = 8.98 \sqrt{N_{Max}} \quad \text{เฮิร์ตซ์} \quad (2.7)$$

ค่า  $foF_2$  ที่แสดงในสมการที่ (2.7) คือความถี่วิกฤติหรือความถี่สุดท้ายที่คลื่นวิทยุสามารถสะท้อนชั้น F2 ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีหน่วยเป็นเมกะเฮิร์ตซ์สามารถคำนวณความสัมพันธ์จากความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ( $N_{Max}$ ) ในชั้น F2 ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนต่อตารางเมตร ( $e/m^3$ ) นอกจากนี้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์หรือมุมซิมินิซ (Zenith angle) รวมถึงปฏิกิริยาที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ตามวัฏจักรเช่น จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (R) หรือสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตร ( $F_{10.7}$ ) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤติของทั้งชั้น F1 และ E ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.8) และ (2.9)

$$foF_1 = (4.3 + 0.01R) \cos^{0.2} \chi \quad \text{เฮิร์ตซ์} \quad (2.8)$$

$$foE^4 = A \bullet B \bullet C \bullet D \quad \text{เฮิร์ตซ์}^4 \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์ A, B, C และ D สามารถคำนวณได้ตามเงื่อนไขในสมการที่ 2.10 a, b, c และ d ซึ่งเงื่อนไขของสมการที่ใช้พิจารณาค่า  $foE$  เป็นมาตรฐานของข้อกำหนด ITU-R P.1239-3 โดยในที่นี้ค่าสัมประสิทธิ์ A จะแปรผกผันตามอิทธิพลของค่าเฉลี่ยดัชนี  $F_{10.7} (\Phi_{12})$  ส่วนสัมประสิทธิ์ B นั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งสูงสุดของมุมซันิธ ( $\chi_{noon}$ ) ในแต่ละฤดูกาล นอกจากนี้ตำแหน่งละติจูด ( $\varphi$ ) ของบริเวณที่ทำการพิจารณาก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้คำนวณค่า  $foE$  ซึ่งพิจารณาจากสัมประสิทธิ์ C และสุดท้ายคือสัมประสิทธิ์ D คือตัวแปรที่ผกผันตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ตามเวลาในแต่ละวัน ( $\chi_a$ ) จากที่กล่าวมาสัมประสิทธิ์ต่างๆ มีสมการดังนี้

$$A = 1 + 0.0094(\Phi_{12} - 66) \quad (2.10 \text{ a})$$

$$B = \cos^m \chi_{noon} \quad (2.10 \text{ b})$$

$$m = \begin{cases} -1.93 + 1.92 \cos \varphi & \text{for } |\varphi| < 32^\circ \\ 0.11 - 0.49 \cos \varphi & \text{for } |\varphi| \geq 32^\circ \end{cases}$$

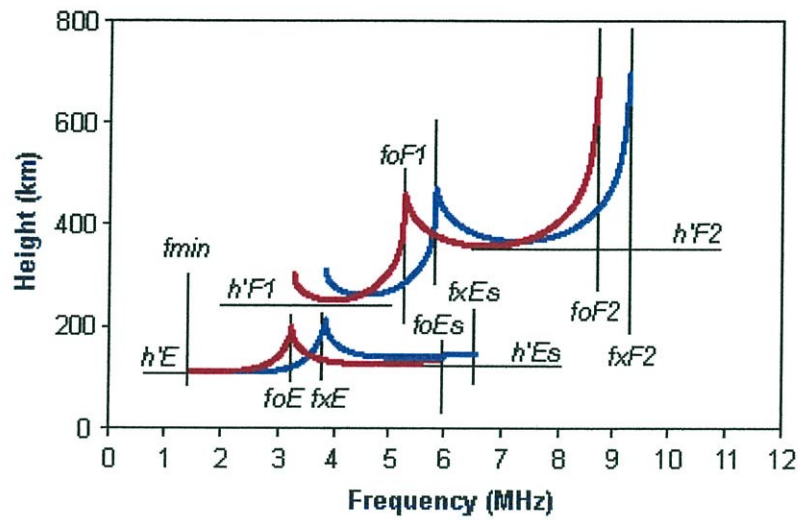
$$C = \begin{cases} 23 + 116 \cos \varphi & \text{for } |\varphi| < 32^\circ \\ 92 + 35 \cos \varphi & \text{for } |\varphi| \geq 32^\circ \end{cases} \quad (2.10 \text{ c})$$

$$D = \cos^n \chi_a \quad (2.10 \text{ d})$$

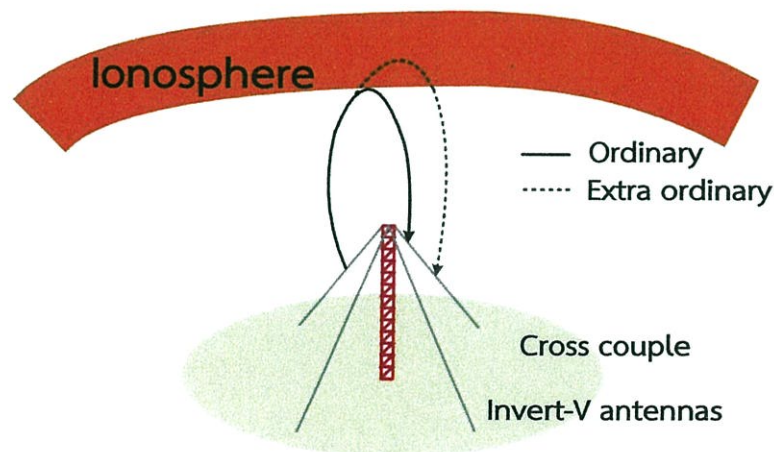
$$n = \begin{cases} 1.2 & \text{for } |\varphi| > 12^\circ \\ 1.31 & \text{for } |\varphi| \leq 12^\circ \end{cases}$$

จากสมการที่กล่าวมาเป็นแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ทำนายค่าความถี่วิกฤติที่เหมาะสมของสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยสมการดังกล่าวพิจารณาจากข้อมูลสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งข้อมูลตัวแปรต่างๆ ถูกแสดงบนภาพที่ประกอบไปด้วยข้อมูล เช่น ระดับความสูง ความถี่สูงสุดที่สามารถสะท้อนชั้นบรรยากาศ หรือความถี่ต่ำสุดที่สามารถตรวจพบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งสามารถวัดได้จากเทคนิคไอโอโนโซนด์ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยภาพที่แสดงนี้เรียกว่า “ไอโอโนแกรม” ซึ่งบนภาพไอโอโนแกรมประกอบด้วยเส้นความถี่สามัญ (Ordinary trace) ของพัลส์ความถี่ที่มีโพลาริซเดียวกับตอนที่ส่งออกไปซึ่งแทนด้วยตัวอักษร  $fo$  และเส้นความถี่สามัญแบบพิเศษ (Extra ordinary) ของพัลส์ความถี่ที่มีลักษณะของโพลาริซที่ต่างจากพัลส์ความถี่ที่ถูกส่งออกไปทำให้พัลส์ความถี่ในช่วงต่างๆ

ถูกหน่วงอยู่ในชั้นบรรยากาศก่อนที่จะสะท้อนกลับลงมาดังภาพที่แสดงในรูปที่ 2.13 ทั้งนี้เนื่องจากดัชนีการหักเหที่เป็นผลมาจากอิทธิพลสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศและอำนาจสนามแม่เหล็กที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศที่ตำแหน่งละติจูดต่างๆซึ่งเส้นความถี่สามัญพิเศษที่แสดงบนไอโอโนแกรมแทนด้วยตัวอักษร  $f_x$  [42]



รูปที่ 2.12 ภาพไอโอโนแกรมและตัวแปรที่วัดบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [43]



รูปที่ 2.13 ตัวแปรจากการสะท้อนกลับของพัลส์ความถี่ [42]

## บทที่ 3

### วิธีการศึกษาวิจัย

การศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากการพิจารณาค่าความถี่วิกฤตชั้นอีและความผิดปกติภายในชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เรียกว่า”ปรากฏการณ์สปอเรติก-E” โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตัวแปรดังกล่าวส่วนหนึ่งสามารถอธิบายได้จากข้อมูลภาพที่บันทึกลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเทคนิคไอโอโนโซนดซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายลักษณะการทำงานของอุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยการใช้เทคนิคไอโอโนโซนดรวมถึงวิธีวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรมที่เป็นข้อมูลเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงบริเวณชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และลักษณะความผิดปกติที่เรียกว่าชั้นสปอเรติก-E ที่เกิดขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

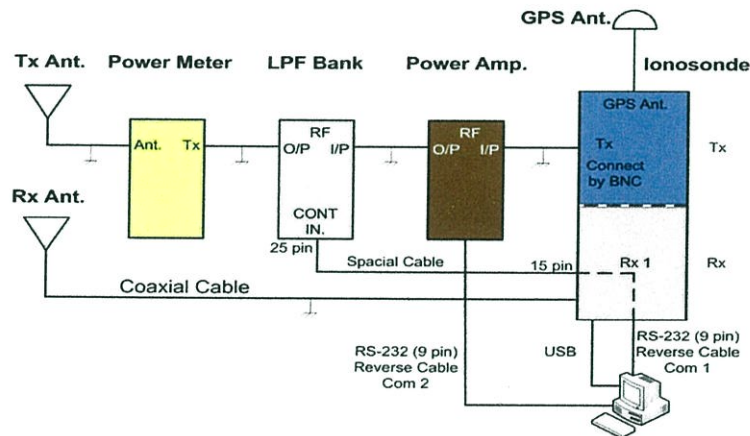
#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ในการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ เครื่องมือหรืออุปกรณ์เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่น่าสนใจใช้บันทึกหรือแสดงข้อมูลลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นเนื้อหาที่นำเสนอในหัวข้อที่ 3.1 นั้นจะอธิบายองค์ประกอบสำคัญของเครื่องมือไอโอโนโซนดที่ใช้ในการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงบริเวณชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

##### 3.1.1 อุปกรณ์และโครงสร้างของเทคนิคไอโอโนโซนด

ในวิทยานิพนธ์ส่วนนี้นำเสนอการศึกษาพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตชั้นอี และความถี่วิกฤตชั้นสปอเรติก-E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ด้วยการตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศโดยใช้เครื่องส่งเครื่องรับความถี่ย่าน HF รุ่น SKI-96092 ที่ติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย หรือที่ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่เส้นลองจิจูด 99.37 องศาตะวันออก เส้นละติจูด 10.72 องศาเหนือซึ่งอยู่ในตำแหน่งละติจูดสนามแม่เหล็กที่ 3 องศาเหนือ

ทั้งนี้ อุปกรณ์สำหรับการวิจัยสภาพชั้นบรรยากาศที่ติดตั้งได้รับการสนับสนุนภายใต้โครงการร่วมวิจัยชื่อ “SEALION” (South East Asia Low-latitude Ionosphere Network) [49] การทำงานของอุปกรณ์ไอโอโนสเฟียร์จะส่งและรับความถี่ในช่วง 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ผ่านทางสายอากาศแบบอินเวอร์ต-วีโดโพล โดยมีอัตราการเพิ่มความถี่ที่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์จากนั้นความถี่ที่สะท้อนชั้นบรรยากาศกลับเข้ามาจะถูกนำไปประมวลผลและบันทึกเป็นข้อมูลไอโอโนแกรมที่เป็นไฟล์ภาพนามสกุล PNG ทุกๆ 5 นาทีตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 สำหรับผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่น่าเสนอในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ผลจากข้อมูลทุก 15 นาทีและพิจารณาเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมง ในช่วงเวลา 7.00-17.00 น. ตามเวลาท้องถิ่น ในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ไอโอโนสเฟียร์ที่ใช้ตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศเหนือบริเวณจังหวัดชุมพร ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์ภายในระบบแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมระบบการทำงานของเครื่องไอโอโนสเฟียร์ [49]

จากรูปบล็อกไดอะแกรมแสดงให้เห็นการทำงานของเทคนิคไอโอโนสเฟียร์ที่ใช้ตรวจสอบพฤติกรรมและสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งโครงสร้างการทำงานในที่นี่สามารถแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อสำคัญ ได้แก่ ชุดเครื่องส่งเครื่องรับพัลส์ความถี่ต่อเนื่อง (Frequency Modulated Continuous Wave : FM/CW) สายอากาศแบบอินเวอร์ต-วีโดโพล และเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับตรวจสอบและประมวลผลการตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดข้อมูลอุปกรณ์ในระบบไอโอโนโซนด [44]

ระบบ	Frequency Modulated-Continuous Wave (FMCW) with pseudo-random Tx/Rx switching
เครื่องส่งเครื่องรับ	SKI-9602 FMCW Radar
กำลังสูงสุดของเครื่องส่ง	20 วัตต์
กำลังเฉลี่ยของเครื่องส่ง	10 วัตต์
ช่วงความถี่ที่ใช้ตรวจวัดชั้นบรรยากาศ	2 ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์
อัตราการเพิ่มความถี่	100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที
รอบการทำงาน	5 นาที
เสาอากาศ	สูง 27 เมตร
ชนิดสายอากาศ	Invert-Vee dipole 2 ชั้นที่มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกัน [45]
ตำแหน่งของสถานี	ละติจูด 10.72 องศาเหนือ ลองจิจูด 99.37 องศาตะวันออก ละติจูดสนามแม่เหล็ก 3.00 องศาเหนือ

### 3.1.1.1 ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับในระบบไอโอโนโซนด

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ในด้านของภาคส่งนั้นประกอบด้วยเครื่องส่งเครื่องรับรุ่น SKI-96092 ที่ทำหน้าที่สร้างพัลส์ความถี่ต่อเนื่องในช่วงความถี่ 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยพัลส์ความถี่ที่ถูกสร้างขึ้นมีอัตราการเพิ่มความถี่ขึ้นทีละ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ดังนั้นในหนึ่งรอบของกระบวนการสร้างพัลส์ความถี่ที่ส่งออกไปและรับกลับเข้ามาจะใช้เวลาดำเนินการประมาณ 5 นาที ทั้งนี้เวลาและตำแหน่งที่ใช้ในการอ้างอิงข้อมูลที่ถูกบันทึกได้จะอาศัยสัญญาณนาฬิกาหรือใช้การอ้างอิงเวลาจากดาวเทียมจีพีเอสจากนั้นพัลส์ความถี่จะถูกส่งต่อไปยังภาคขยายกำลัง โดยกำลังงานของพัลส์ความถี่ที่ถูกขยายจะอยู่ที่ประมาณ 10 วัตต์ เมื่อพัลส์ความถี่ต่อเนื่องถูกขยายกำลังงานและพร้อมส่งออกอากาศจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ (Low pass filter bank) เพื่อจำกัดค่าความถี่ที่ส่งผ่านออกไปเพื่อใช้ตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงความถี่ที่กำหนดไว้ก่อนหน้า นอกจากนี้ก่อนการส่งออกอากาศจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังงานการส่งผ่านของพัลส์ความถี่ที่เกิดขึ้นด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ (Power meter) เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) ระหว่างอุปกรณ์ภาคส่งในระบบกับสายอากาศ หลังจากพัลส์ความถี่ถูกส่งออกอากาศไปตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศสะท้อนกลับมา ในส่วนของภาครับพัลส์ความถี่ที่รับเข้ามาเมื่อผ่านเครื่องรับก็จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของข้อมูลแบบไบนารีจากนั้นจะถูกนำไปประมวลผลเป็นภาพไอโอโนแกรมและบันทึกข้อมูล

บนคอมพิวเตอร์จากทั้งหมดที่กล่าวมาในรูปที่ 3.2 แสดงรูปของชุดอุปกรณ์เครื่องส่งเครื่องรับของระบบไอโอโนโซนดท์ที่ติดตั้งไว้ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเพื่อใช้ตรวจวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณใกล้แนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก

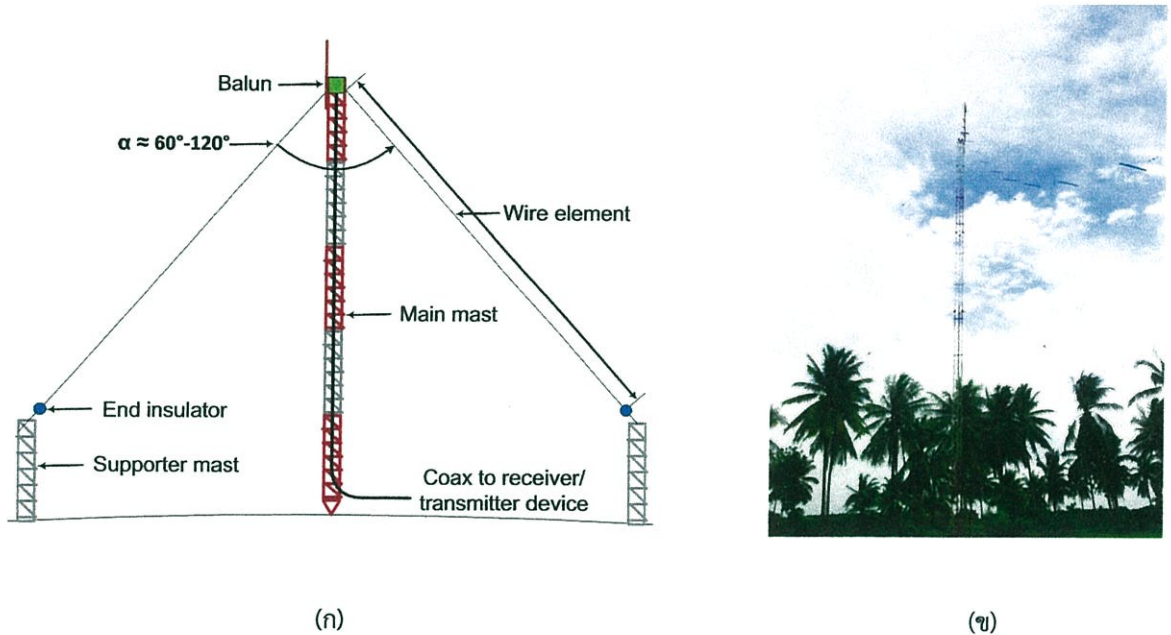


รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์เครื่องส่งเครื่องรับภายในระบบไอโอโนโซนดท์

#### 3.1.1.2 สายอากาศอินเวิร์ต-วีไดโพล

อินเวิร์ต-วีไดโพลเป็นสายอากาศไดโพลประเภทครึ่งคลื่น (Half-wave dipole) ที่ถูกประยุกต์รูปแบบมาจากสายอากาศแบบฮาล์ฟ-เวฟไดโพลปกติ โดยการจัดวางองค์ประกอบสายนำสัญญาณสำหรับแพร์กระจายคลื่น (Wire element) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากด้านข้างจะคล้ายกับตัวอักษรวีในภาษาอังกฤษกลับหัว (Inverted-vee) ซึ่งในรูปที่ 3.3 (ก) แสดงให้เห็นแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศแบบอินเวิร์ต-วีไดโพลที่ประกอบด้วยเสาหลัก (Mainmast) ที่ติดตั้งบาลัน (Balun) บนความสูง 27 เมตรเพื่อใช้ปรับสมดุลค่าความต้านทานรวมขององค์ประกอบสายนำสัญญาณทั้งสองข้างอยู่ที่ 50 โอห์ม และที่ส่วนปลายขององค์ประกอบสายนำสัญญาณจะถูกยึดติดกับเสาด้านล่าง (Supporter Mast) ที่สูงจากพื้นดิน 5 เมตรด้วยวัสดุที่เป็นฉนวน เพื่อประคองความชันองค์ประกอบสายอากาศทั้งสองข้างให้มีมุมห่างกันประมาณ 60-120 องศา แต่โดยทั่วไปแล้วมุมระหว่างองค์ประกอบสายอากาศจะห่างกันประมาณ 90 องศา ในรูปที่ 3.3 (ข) แสดงรูปสายอากาศแบบอินเวิร์ต-วีไดโพลที่ติดตั้งภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร จากรูปที่ 3.3 (ข) จะเห็นว่า

องค์ประกอบสายนำสัญญาณคือส่วนที่เป็นสายนำสัญญาณโดยมีวัสดุไดอิเล็กตริกคั่นระหว่างสายนำสัญญาณที่ขนานกันคล้ายบันไดเชือกที่ทอดตัวไปยังส่วนยอดจากคุณสมบัติที่กล่าวมาพบว่าข้อดีของสายอากาศชนิดดังกล่าวมีขนาดเล็กและความซับซ้อนด้านโครงสร้างของสายอากาศที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศแบบฮาล์ฟเวฟไดโพลที่ใช้งานในย่านความถี่เดียวกัน [49]



รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบอินเวิร์ต-วีไดโพล

### 3.1.1.3 คอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลระบบไอโอโนแกรม

ในการประมวลผลและบันทึกข้อมูลด้วยเทคนิคไอโอโนโซนดคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งที่สถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรจะทำหน้าที่คำนวณและประมวลผลข้อมูลไบนารี (Binary) ที่ได้จากการแปลงพัลส์ความถี่ที่รับเข้ามาเป็นภาพไอโอโนแกรมไฟล์ PNG พร้อมทั้งบันทึกลงบนคอมพิวเตอร์ทุกๆ 5 นาที ซึ่งในรูปที่ 3.4 (ก) แสดงสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ตรวจวัดได้เหนือบริเวณสถานีชุมพรนอกจากการคำนวณและประมวลผลข้อมูลไอโอโนแกรมแล้วนั้นคอมพิวเตอร์ในส่วนนี้ยังเป็นตัวกลางในการตรวจสอบการทำงานของระบบเครื่องส่งเครื่องรับไอโอโนโซนดรวมทั้งทำการส่งผ่านข้อมูลไอโอโนแกรมไปเก็บรวบรวมในระบบฐานข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์เซิร์ฟเวอร์

ในรูปที่ 3.4 (ข) แสดงลักษณะของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผลข้อมูลที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรและจากข้อมูลภาพไอโอโนแกรมที่ได้นั้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงและพิจารณากรณีศึกษาของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทั้งนี้ในการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรมนั้นสามารถวัดค่าตัวแปรได้โดยใช้โปรแกรม Special scaling ที่สามารถติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer) เพื่อใช้พิจารณาตัวแปรต่างๆที่เกิดขึ้นบนภาพไอโอโนแกรมซึ่งจะถูกอธิบายต่อไปในหัวข้อ 3.2 สำหรับตัวแปรที่เลือกศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นตัวแปรที่เกิดขึ้นในชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ 2 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรค่าความถี่วิกฤติของชั้นอี (foE) และค่าความถี่วิกฤติของชั้นสเปเรติก-E (foEs) ที่เกิดจากการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนของชั้นอีมากกว่าปกติและมีแนวโน้มที่สัมพันธ์ต่อปริมาณของอิเล็กตรอนที่จะก่อให้เกิดปรากฏการณ์ซินทิลเลชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นในเวลากลางวัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูลไอโอโนแกรม

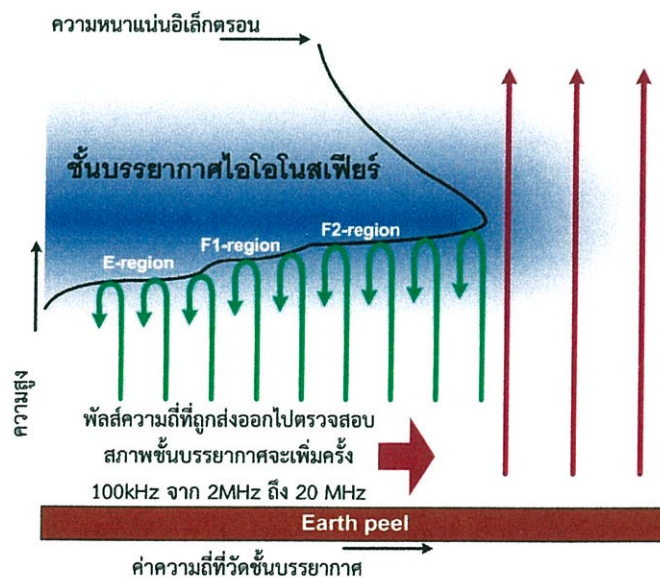
### 3.2 ตัวแปรที่พิจารณาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์

จากหัวข้อก่อนหน้านี้ได้นำเสนอเครื่องมือและองค์ประกอบที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ประกอบด้วย ชุดเครื่องส่งเครื่องรับของเทคนิคไอโอโนโซนด ในส่วนนี้จะอธิบายถึงวิธีและกระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสภาพชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ศึกษาจากภาพไอโอโนแกรมที่จะแสดงให้เห็นแนวโน้มค่าความถี่วิกฤติที่มีผลตอบสนองกับชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงให้เห็นพฤติกรรมและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือจังหวัดชุมพรซึ่งเกิดจากอิทธิพลจากแนวละติจูดสนามแม่เหล็กโลก

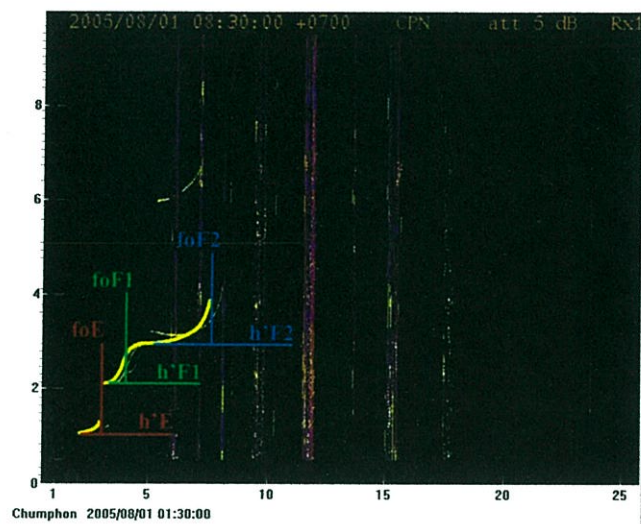
และนอกจากนี้ข้อมูลความถี่วิกฤติชั้นอื่นที่ได้จากการตรวจสอบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความถี่วิกฤติบริเวณชั้นอื่นที่ทำนายจากแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

### 3.2.1 ตัวแปรบนข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

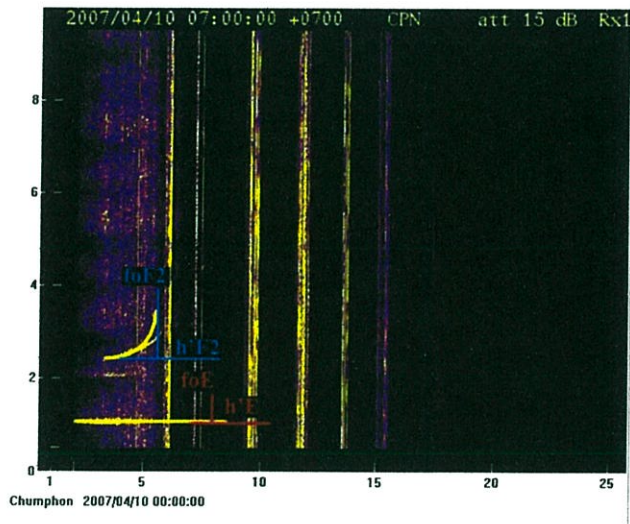
ในรูปที่ 3.5 นั้นแสดงลักษณะของพัลส์ความถี่ที่ถูกส่งออกไปตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด์ จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าพัลส์ความถี่สะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะไปปรากฏเป็นข้อมูลบนภาพไอโอโนแกรมที่ประกอบไปด้วยตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับการพิจารณาตัวแปรในรูป 3.6 แสดงภาพตัวแปรบนไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันซึ่งแบ่งเป็นชั้น E , F1 และ F2 ซึ่งความหมายของตัวแปรที่แสดงบนไอโอโนแกรมยกตัวอย่างเช่น ค่าความถี่วิกฤติชั้น E (Ordinary critical frequency of E layer: foE) ความสูงเสมือนชั้น F2 (Virtual height of F2 layer : h'F2) เป็นต้น นอกจากนี้ในรูปที่ 3.7 ยังแสดงตัวอย่างของปรากฏการณ์สปอเรติก-E ประเภทคิว ซึ่งเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถตรวจสอบได้ในบริเวณ 15 องศารอบแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกในเวลากลางวันซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.5 ลักษณะพัลส์ความถี่ที่ถูกส่งไปตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [45]



รูปที่ 3.6 ตัวแปรบนไอโอโนแกรมในช่วงเวลาที่ไม่มีความผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



รูปที่ 3.7 ตัวแปรบนไอโอโนแกรมในช่วงเวลาที่มีความผิดปกติชั้นสพอเรติก-E

โดยทั่วไปในการจำแนกปรากฏการณ์สพอเรติก-E นั้นมีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับบริเวณที่ทำการศึกษา แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายลักษณะของชั้นสพอเรติก-E เพียงกรณีเดียว ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นบริเวณเหนือและต่ำกว่าแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก 15 องศา โดยชั้นสพอเรติก-E ลักษณะดังกล่าวจะถูกพิจารณาเป็นชั้นสพอเรติก-E ประเภท “q” (q-type Sporadic-E) ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์จากภาพไอโอโนแกรมที่สามารถบันทึก

ได้เหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร จากการพิจารณาแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกพบว่าบริเวณดังกล่าวมีตำแหน่งที่ตั้งอยู่เหนือแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กประมาณ 3 องศา ดังนั้นในการศึกษาความผิดปกติของชั้นสเปอเรติก-E ประเภทคิวจึงถูกเลือกศึกษาเพียงกรณีเดียว

### 3.2.2 การใส่หมายเหตุอธิบายเหตุผล

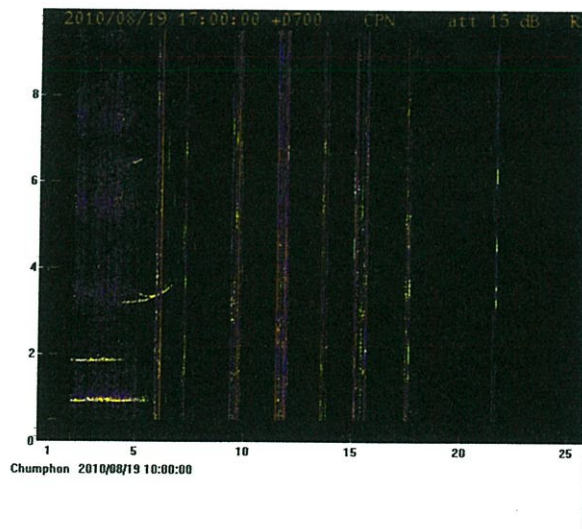
ในการวิเคราะห์และพิจารณาค่าความถี่วิกฤติของชั้นอีและชั้นสเปอเรติก-E นอกจากค่าตัวแปรในเชิงตัวเลขที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาแล้วนั้น ในบางกรณีอาจจะพบเหตุการณ์สำคัญหรือความผิดปกติบางอย่างจากการวัดค่าบนไอโอโนแกรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการใส่หมายเหตุเพื่ออธิบายคุณสมบัติหรือเงื่อนไขที่ใช้พิจารณาตัวแปรที่เลือกศึกษา (Qualifying) และหมายเหตุเพื่ออธิบายเหตุผลที่ใช้ในการตัดสินใจพิจารณาค่าตัวแปรนั้น (Descriptive) โดยหมายเหตุดังกล่าวเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษที่นิยมความหมายภายใต้ข้อกำหนดของสมาคมการวิจัยวิทยาศาสตร์ด้านการสื่อสารนานาชาติ(The International Union Radio Science : URSI) [35] ซึ่งเป็นกลุ่มองค์กรวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานความถี่วิทยุและกำหนดมาตรฐานการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์สำหรับการใส่หมายเหตุเพื่ออธิบายคุณสมบัติหรือเงื่อนไขจะประกอบไปด้วยตัวอักษรทั้งหมด 10 ตัวอักษร คือ A,D,E,I,J,M,O,T,U,Z และในกลุ่มตัวอักษรหมายเหตุเพื่ออธิบายเหตุผลที่ใช้ในการตัดสินใจประกอบไปด้วยตัวอักษรทั้งหมด 23 ตัวอักษร คือ A,B,C,D,E,F,G,H,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,V,W,X,Y,Z แต่อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายความหมายเฉพาะตัวอักษรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่นำเสนอเท่านั้น โดยจะเรียงลำดับตามตัวอักษรในภาษาอังกฤษสำหรับการใส่หมายเหตุที่พบจากตัวแปรบนไอโอโนแกรมตัวอักษรที่ใช้อธิบายหมายเหตุจะปรากฏในตารางข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งหมายเหตุจากการแปรความหมายตัวแปรที่วิเคราะห์ได้บนไอโอโนแกรมจะถูกนำไปพิจารณากับปัจจัยสภาพแวดล้อมที่เกิดขึ้นในกรณีที่เกิดความผิดปกติภายในชั้นบรรยากาศ โดยรายละเอียดต่างๆบนตารางตัวแปรประกอบด้วย ชื่อสถานี วันเวลาที่สามารถบันทึกข้อมูลได้ ตัวแปรที่พิจารณา ค่าตัวแปรที่สามารถวัดได้ และหมายเหตุ จากตัวอย่างในรูปที่ 3.8 ตัวอย่างชื่อสถานีคือ CPNFC บันทึกเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม ค.ศ. 2005 ที่เวลา 1:30 ตามเวลาสากลเชิงพิกัด (UTC : Coordinated Universal Time)

	factor	value	qualifying/ descriptive
97	-CPNFC 2005/08/01 01:39:00		
98	fmin	foE	h'E
99	h'E2	fzE	fminE
100	h'E3	fminEs	foEs
101	TYPE3	fbEs	foEs-type2
102	fbEs-type2	foEs-type3	h'Es-type3
103	fxEs	fEs	fm2E
104	fminF	foFO.5	foF1
105	M(3000)F1	h'FO.5	h'F
106	h'F2	h'F1.5	foF2
107	M(3000)F2	foI	fxI
108	dfs2	dfs3	dfs4
109	fxI1	fxI2	fzF2
110	hdF2	hpF2	hmF2
111	Zm	ypF2	h'F1
112	foI1	foI2	f1MUF

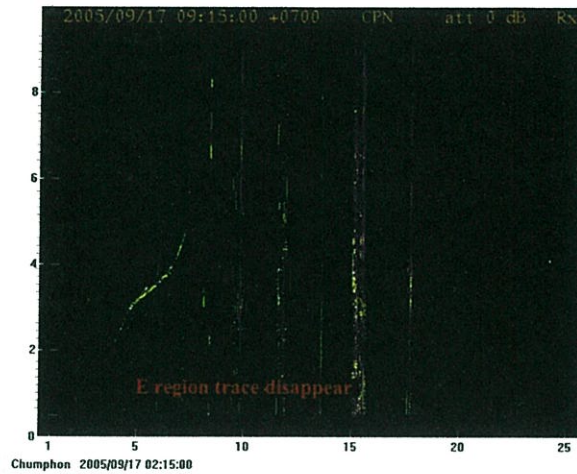
รูปที่ 3.8 ตารางตัวแปรที่ได้จากการวัดค่าบนไอโอโนแกรม

จากตัวอย่างตารางการวิเคราะห์ข้อมูลบนไอโอโนแกรมที่มีการพิจารณาหมายเหตุที่แสดงไปก่อนหน้านี้ในรูปที่ 3.8 ในส่วนถัดไปจะเป็นการอธิบายนิยามความหมายของตัวอักษรหมายเหตุที่ใช้ อธิบายเงื่อนไขในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์ ดังนี้

A ในการอธิบายคุณสมบัติของตัวแปรที่พิจารณาหมายถึงค่าตัวแปรดังกล่าวถูกบดบัง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลในขณะนั้นได้ยกตัวอย่างกรณีการเกิดปรากฏการณ์ของชั้นสเปเรติก-E บนไอโอโนแกรม ในรูปที่ 3.9 จะพบว่าค่าความถี่วิกฤติของชั้น E และ F ถูกบดบังจากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้ไม่สามารถพิจารณาค่าความถี่วิกฤติของแต่ละชั้นได้



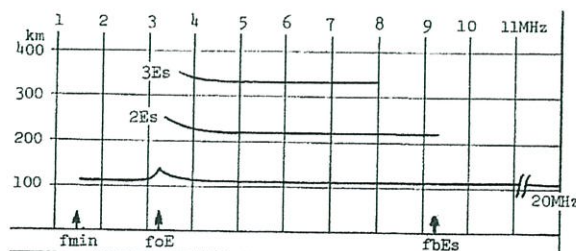
รูปที่ 3.9 สถานะตัวแปร foE มีสถานะเป็น A



รูปที่ 3.10 สถานะตัวแปร foE มีสถานะเป็น B

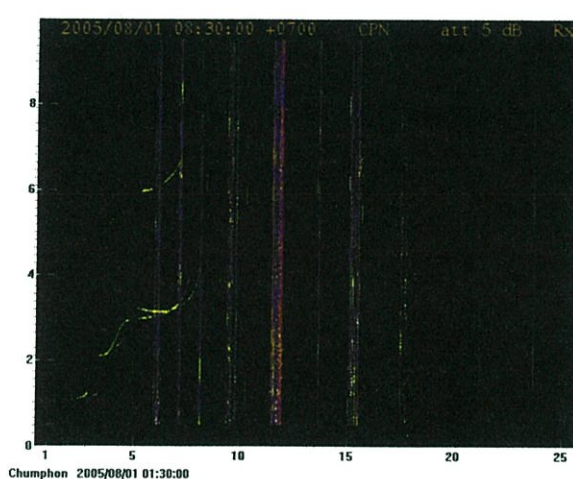
B หมายถึง กรณีที่ไม่พบเส้นแนวโน้มตัวแปรที่พิจารณาปรากฏบนไอโอโนแกรมยกตัวอย่างเช่นกรณีในรูปที่ 3.10 จะเห็นได้จากตัวอย่างไอโอโนแกรมบริเวณตำแหน่งชั้น E ไม่สามารถพิจารณาตัวแปรค่า foE ได้ ดังนั้นหมายเหตุจึงมีสถานะเป็น B ซึ่งในการพิจารณาค่าตัวแปร foE อาจใช้เงื่อนไขในการพิจารณาตัวแปรดังกล่าวอาจพิจารณาจากบริเวณตำแหน่งเริ่มต้นของชั้น F1

D หมายถึง กรณีที่ค่าตัวแปรที่เลือกพิจารณามีค่ามากกว่าขอบเขตบนไอโอโนแกรมทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าความถี่สุดท้ายของตัวแปรที่เกิดขึ้นได้ เช่น ในตัวอย่างไอโอโนแกรมรูปที่ 3.11 แสดงกรณีตัวอย่างที่เส้นแนวโน้มความถี่วิกฤตชั้นสเปเรติก-E ชั้นแรกมีค่ามากกว่าขอบเขตที่สามารถแสดงได้บนไอโอโนแกรมและนอกจากนี้จะเห็นว่าในรูปตัวอย่างนั้นมีชั้นสเปเรติก-E เกิดขึ้นทั้งหมด 3 ชั้น ได้แก่ Es, 2Es และ 3Es จากความผิดปกติลักษณะนี้ทำให้ตั้งเป็นข้อสังเกตได้ว่าที่ชั้น Es มีแนวโน้มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น



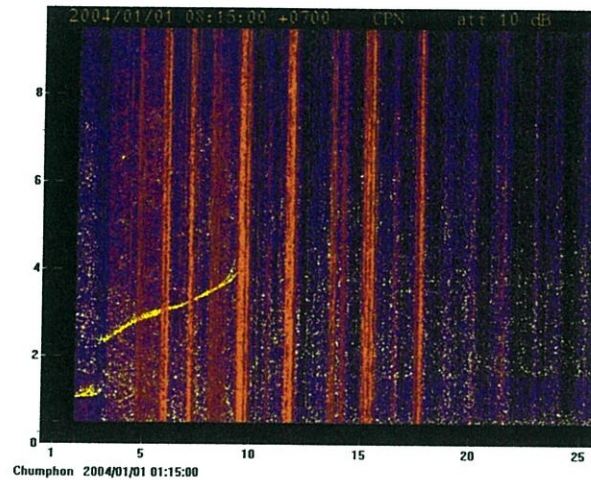
รูปที่ 3.11 กรณีตัวอย่างเมื่อตัวแปร foEs มีสถานะเป็น D

E หมายถึง ค่าของตัวแปรที่เลือกพิจารณาน้อยกว่าขอบเขตบนไอโอโนแกรมหรืออาจเป็นการแสดงสถานะของตัวแปรในกรณีที่ไม่มีเกิดเหตุการณ์ที่กำลังพิจารณาอยู่ซึ่งอาจจะใส่ตัวอักษรแสดงเงื่อนไขการพิจารณาเพิ่มเข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างกรณีพิจารณาตัวแปรของชั้นสพอตเรติก-E พบว่ายังไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวสามารถใส่หมายเหตุนี้ได้ หรือในกรณีที่พิจารณาค่าความถี่วิกฤติชั้นอีในช่วงเช้าและก่อนดวงอาทิตย์ตกดินซึ่งพบว่าค่าความถี่วิกฤติที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าขอบเขตบนไอโอโนแกรม



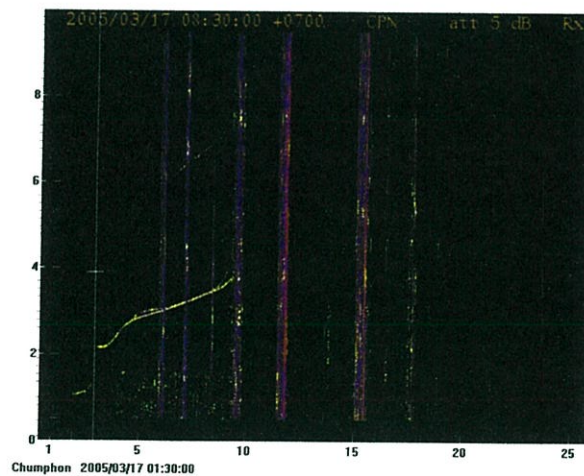
รูปที่ 3.12 สถานะตัวแปร foEs มีสถานะเป็น E

F หมายถึง เส้นแนวโน้มตัวแปรที่พิจารณามีการกระจายตัวทำให้ต้องพิจารณาค่าตัวแปรดังกล่าวด้วยวิธีอื่น ซึ่งกรณีการกระจายตัวของเส้นแนวโน้มของชั้นบรรยากาศสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งชั้น E และ F จากตัวอย่างในรูปที่ 3.13 เป็นการกระจายตัวของเส้นแนวโน้มในชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเส้นแนวโน้มที่เกิดขึ้นจะเห็นได้ว่าเส้นแนวโน้มที่แสดงตำแหน่งความถี่วิกฤติชั้น E มีลักษณะที่กระจายตัว ดังนั้นในการตัดสินใจวัดค่าตัวแปรความถี่วิกฤติบนไอโอโนแกรมอาจจะต้องใช้เงื่อนไขสำหรับพิจารณาค่าความถี่วิกฤติชั้น E โดยในกรณีตัวอย่างในรูปที่ 3.13 อาจจะใช้เงื่อนไขการพิจารณาค่าความถี่วิกฤติชั้น E จากตำแหน่งชั้น F1 ในการพิจารณาร่วมด้วย



รูปที่ 3.13 สถานะตัวแปร foE มีสถานะเป็น F

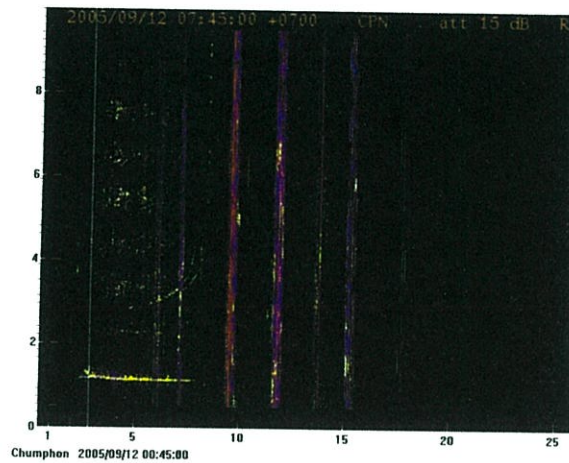
G หมายถึง ความหนาแน่นของการไอออไนซ์ ณ ช่วงเวลาที่พิจารณาเบาบางจนกระทั่งไม่สามารถพิจารณาได้ ซึ่งในกรณีที่ตัวแปร foEs ไม่มีค่าก็สามารถใส่ตัวอักษรนี้ร่วมกับตัวอักษรแสดงสถานะเป็น EG ได้เช่นกัน โดยกรณีตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 สถานะตัวแปร foEs อยู่ในกรณีที่ เป็น G

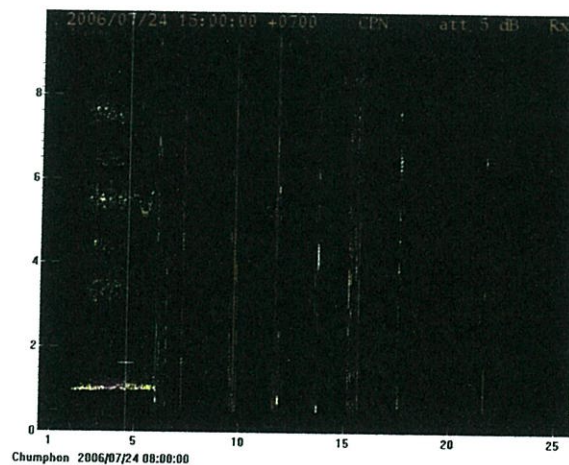
J ใช้เฉพาะกรณีแสดงหมายเหตุเพื่ออธิบายเงื่อนไขการพิจารณาค่าตัวแปรที่ไม่สามารถพิจารณาตัวแปรที่ต้องการวิเคราะห์ได้จากแนวโน้มหลักหรือค่าตัวแปรสามัญ (Ordinary) ทำให้ต้องพิจารณาค่าตัวแปรดังกล่าวจากแนวโน้มรองหรือค่าตัวแปรสามัญพิเศษ (Extraordinary) ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 3.15 ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ค่าตัวแปร foEs ได้โดยตรงดังนั้นในการพิจารณาตัวแปร foEs

จะต้องวิเคราะห์ค่าผลต่างระหว่างค่าตัวแปรสามัญพิเศษที่วัดได้กับค่าส่วนต่างครึ่งหนึ่งของความถี่โร (gyro-frequency) [46] โดยที่ค่าส่วนต่างครึ่งหนึ่งของความถี่โรที่บริเวณจังหวัดชุมพรมีค่าประมาณ 0.44 เมกะเฮิรตซ์



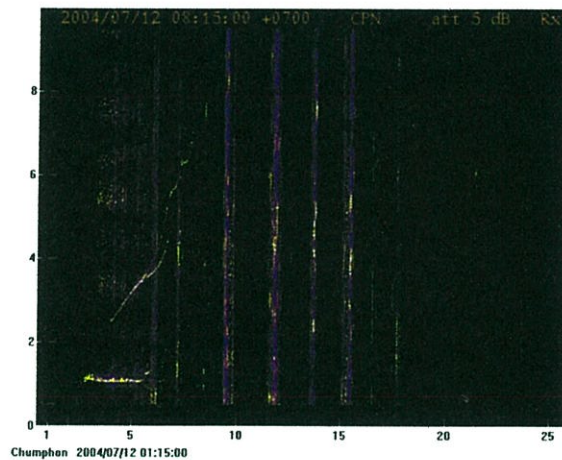
รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการพิจารณาตัวแปร foEs ที่อยู่ในเงื่อนไข J

S หมายถึง ตัวแปรที่เลือกพิจารณาบนไอโอโนแกรมไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจาก การแทรกสอดจากความถี่ข้างเคียงหรือแนวโน้มของพัลส์ความถี่ที่ใช้ตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศ ที่ขาดหายไปดังเช่นในรูปที่ 3.16 ซึ่งในรูปดังกล่าวพบว่าเกิดการแทรกสอดที่บริเวณชั้น F 1 ทำให้ไม่สามารถ พิจารณาตัวแปร foE



รูปที่ 3.16 ตัวแปร foE ที่พิจารณาเป็นกรณี S

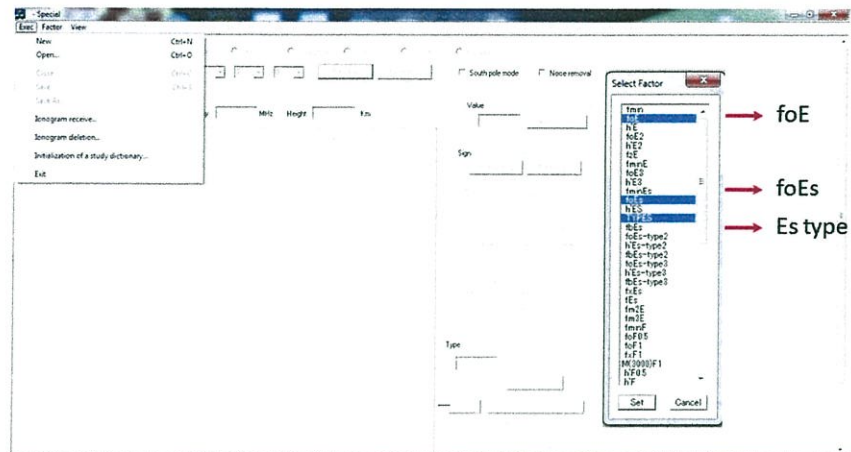
U ใช้เฉพาะกรณีแสดงหมายเหตุเพื่ออธิบายเงื่อนไขการพิจารณาค่าตัวแปรหมายถึงค่าตัวแปรที่เลือกพิจารณามีแนวโน้มที่เกิดขึ้นบนไอโอโนแกรมไม่ชัดเจนหรือผู้วิเคราะห์ที่ไม่แน่ใจค่าตัวแปรบนไอโอโนแกรมที่กำลังพิจารณา โดยจะเห็นได้จากตัวแปร foE ในรูปที่ 3.17 ซึ่งในการพิจารณาค่าตัวแปรดังกล่าวจะพิจารณาบริเวณจุดส่งผ่านระหว่างชั้น E และชั้น F1 และใส่หมายเหตุกำกับเป็น UA โดยที่ตัวอักษร U เป็นการอธิบายลักษณะตัวแปร foE ที่พิจารณาอยู่นั้นอาจจะมีค่าใกล้เคียงกับบริเวณที่สามารถมองเห็นจากค่าความถี่ต่ำที่สุดของชั้น F1 ส่วนตัวอักษร A เป็นการอธิบายเหตุผลว่าเกิดปรากฏการณ์สไปเรติก-E ในขณะนั้น



รูปที่ 3.17 สถานะตัวแปร foE อยู่ในกรณีที่เป็น U

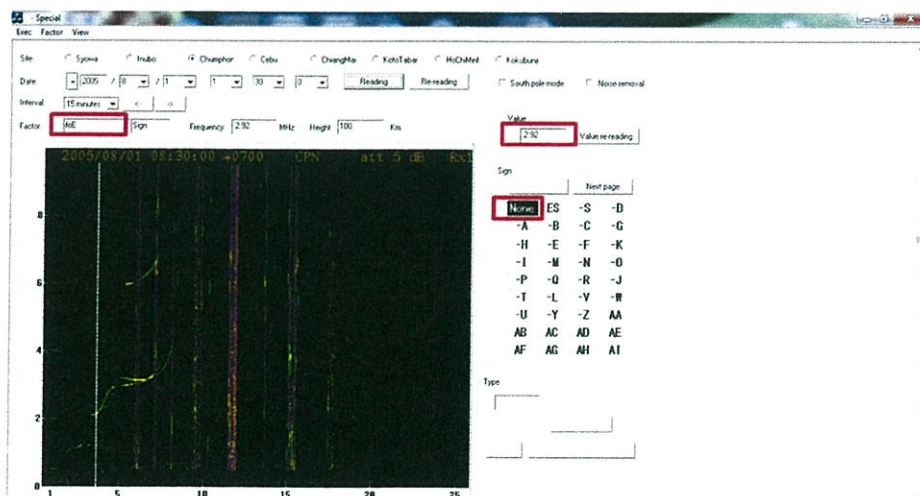
### 3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรมวัดค่าตัวแปรบนไอโอโนแกรม

หลังจากที่ได้ข้อมูลไอโอโนแกรมจากการวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาแล้วนั้น ในการวัดค่าตัวแปรบนไอโอโนแกรมจะใช้โปรแกรมสเปเชียลสเกลลิง (Spacial scaling) เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าตัวแปร ในรูปที่ 3.18 แสดงหน้าต่างเมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา ชั้นแรกต้องสร้างไฟล์ข้อมูลโดยคลิกที่ Exec จากนั้นเลือก New ต่อมาจะปรากฏกล่อง Select factor เพื่อเลือกตัวแปรที่จะทำการพิจารณาบนไอโอโนแกรม ซึ่งจากตัวอย่างในรูป 3.18 เลือกพิจารณาตัวแปรทั้งหมด 3 ตัว ได้แก่ ค่าความถี่วิกฤติชั้นอี (foE), ค่าความถี่วิกฤติชั้นสไปเรติก-E (foEs) และประเภทของชั้นสไปเรติก-E (Es type) จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Set เพื่อเริ่มกระบวนการวัดค่าตัวแปรบนไอโอโนแกรม



รูปที่ 3.18 หน้าต่างแสดงการสร้างไฟล์และการเลือกตัวแปรที่พิจารณา

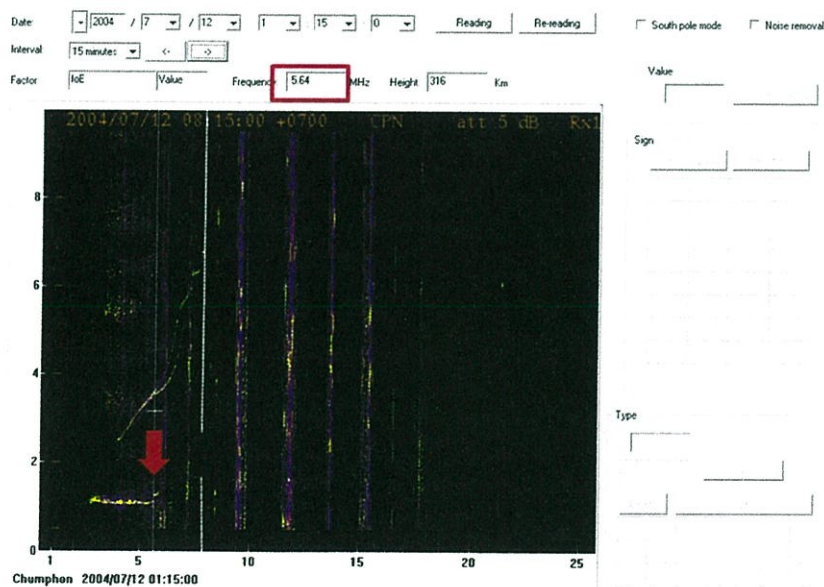
เมื่อเลือกตัวแปรที่ต้องการพิจารณาเสร็จแล้ว จากนั้นให้ทำการเลือกสถานี (Site) วัน เวลา (Date) และกำหนดช่วงขอข้อมูลที่ต้องการศึกษา (Interval) ในรูปที่ 3.19 แสดงกรณีที่ไม่เกิดความผิดปกติบนไอโอโนแกรมโดยเป็นข้อมูลจากสถานีชุมพร (Chumphon) ที่สามารถบันทึกได้ในวันที่ 1 สิงหาคม ปีพ.ศ. 2548 ที่เวลา 1:30 นาฬิกาตามเวลาสากลเชิงพิกัดซึ่งจากตัวแปรที่พิจารณาบนภาพไอโอโนแกรมจะเห็นว่าแนวโน้มตัวแปรค่าความถี่วิกฤตชั้นอีที่เลือกพิจารณามีค่า 2.92 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนตัวแปรอื่นจะมีค่าเป็น None หมายถึงไม่ใส่หมายเหตุ



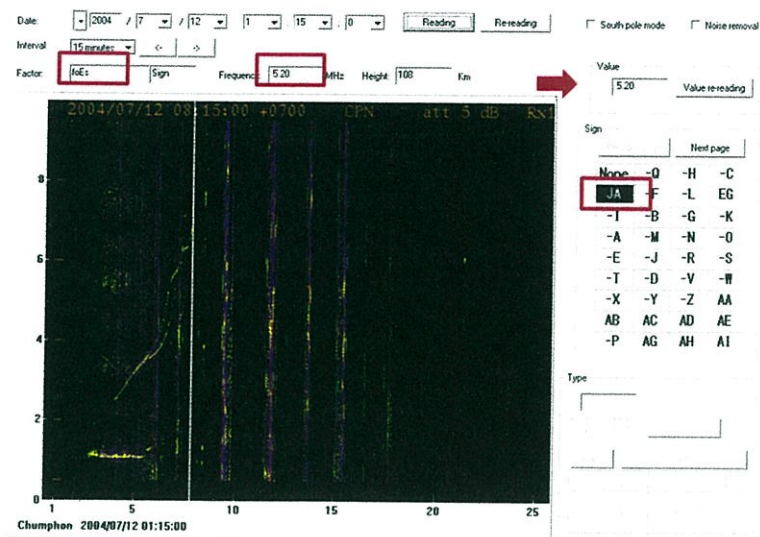
รูปที่ 3.19 การวัดค่าตัวแปร foE ในกรณีปกติ

นอกจากนี้ในบางครั้งลักษณะเส้นแนวนอนของสภาพชั้นบรรยากาศบริเวณชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อาจจะเกิดความผิดปกติจากการกระจายตัวของกลุ่มอิเล็กตรอนทำให้เห็นเป็นเส้นแนวนอนชั้นสเปคตรัม-E ซึ่งจากตัวอย่างในรูปที่ 3.20 พบว่าเส้นแนวนอนค่าความถี่วิกฤติบริเวณชั้นสเปคตรัม-E ที่เกิดขึ้นมีการซ้อนกันขององค์ประกอบสามัญและองค์ประกอบสามัญพิเศษที่ทำให้เส้นแนวนอนความถี่วิกฤติเกิดเป็นเส้นยาวคล้ายกับเป็นเส้นเดียวกัน จากการวัดค่าความถี่วิกฤติสูงสุดของเส้นแนวนอนความถี่วิกฤติชั้นสเปคตรัม-E ที่เกิดขึ้นมีค่า 5.64 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าความถี่วิกฤติของตัวแปร  $f_xEs$  ที่จะนำไปใช้ในการหาค่าความถี่วิกฤติชั้น E ขององค์ประกอบสามัญหรือค่าตัวแปร  $f_oEs$

สำหรับการพิจารณาตัวแปร  $f_oEs$  จากค่าความถี่วิกฤติของตัวแปร  $f_xEs$  ที่แสดงในรูป 3.20 การพิจารณาค่าความถี่วิกฤติชั้นสเปคตรัม-E นั้นจะถูกนำไปใช้พิจารณากับค่าส่วนต่างครึ่งหนึ่งของความถี่โรที่พิจารณาจากผลต่างระหว่างค่า  $f_xEs$  และ  $f_oEs$  โดยที่ส่วนต่างครึ่งหนึ่งของความถี่โรบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศจังหวัดชุมพรมีค่าประมาณ 0.44 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นความถี่วิกฤติชั้นสเปคตรัม-E ที่พิจารณาในโปรแกรมมีค่า 5.20 เมกะเฮิร์ตซ์ และใส่หมายเหตุเป็น JA หมายถึงให้พิจารณาตัวแปรตามเงื่อนไขเนื่องจากแนวโน้มองค์ประกอบ 2 ตัวแปรซ้อนกันดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ความถี่สูงสุดของตัวแปร  $f_xEs$  ในชั้นสเปคตรัม-E



รูปที่ 3.21 ค่าตัวแปร foEs ที่พิจารณาจากตัวแปร fxEs

## บทที่ 4

# ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤตชั้นอีและแบบจำลองอ้างอิง มาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ข้อมูลและผลการวิเคราะห์แนวโน้มค่าความถี่วิกฤต (Critical frequency) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์บทนี้เป็นการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตที่สามารถวัดได้จากชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (foE) ที่เกิดขึ้นทุก 15 นาทีและพิจารณาผลวิเคราะห์ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงเพื่อให้สอดคล้องต่อการนำไปพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foE ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (International Reference Ionosphere) หรือแบบจำลอง IRI ในช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 โดยข้อมูลสภาพชั้นบรรยากาศบริเวณดังกล่าวสามารถวัดค่าความถี่วิกฤตได้จากเทคนิคไอโอโนโซนดท์ที่เป็นชุดอุปกรณ์วัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกติดตั้งไว้ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ซึ่งมีตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ที่ละติจูด 10.73 องศาเหนือและตำแหน่งลองจิจูด 99.37 องศาตะวันออก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาดำแหน่งดังกล่าวตามแกนสนามแม่เหล็กโลก ที่บริเวณดังกล่าวตั้งอยู่เหนือแนวละติจูดของเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกประมาณ 3 องศา ทั้งนี้ข้อมูลในช่วงเวลาที่ถูกเลือกนำมาวิเคราะห์จะถูกแสดงผลให้เห็นค่า foE ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบรายวันและแบบฤดูกาลรวมถึงการพิจารณาเปรียบเทียบค่า foE ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อแสดงให้เห็นผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในแต่ละฤดู โดยอาศัยการอธิบายจากการแปรความหมายด้วยข้อมูลทางสถิติที่พิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างค่า foE ที่เป็นผลการทำนายค่าด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และค่า foE ที่สามารถตรวจสอบได้เหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศ ในทำนองเดียวกันจากข้อมูลยังถูกพิจารณาค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square error) ที่แสดงการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทำนายค่า foE ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ด้วยแบบจำลอง IRI กับค่า foE ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากการวัดสภาพชั้นบรรยากาศเหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลและผลการวิเคราะห์ความเปลี่ยนแปลงค่า foE จะถูกนำไปใช้ในพิจารณา เพื่อปรับปรุงและยืนยันผลการทำนายค่าความถี่วิกฤติของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปพิจารณาแนวโน้มความถี่ที่สามารถใช้ในการสื่อสารภายในชั้นไอโอโนสเฟียร์

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤติชั้นไอโอโนสเฟียร์

หัวข้อแรกในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล foE ที่ทำการวัดได้เหนือสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 โดยผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่นำเสนอในบทนี้เลือกพิจารณาข้อมูลในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. สำหรับเหตุผลที่พิจารณาข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวเนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์กำเนิดพัลส์ความถี่ในระบบไอโอโนโซนดที่สามารถสร้างพัลส์ความถี่ได้เพียงในช่วงความถี่ 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ทำให้ไม่สามารถวัดสภาพชั้นบรรยากาศได้เพราะว่าปริมาณของอิเล็กตรอนนอกเหนือจากช่วงเวลาที่พิจารณาไม่ตอบสนองกับความถี่ ดังนั้นจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงข้อมูลตามเวลาจะถูกแสดงเป็นแบบรายวันและแบบฤดูกาลตามหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤติชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน

ข้อมูลสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่พิจารณาจากค่า foE ที่สามารถวัดได้จากสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ตั้งอยู่ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า foE ที่เกิดขึ้นทุก 15 นาทีและพิจารณาผลวิเคราะห์ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงระหว่างเวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 ทั้งนี้จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foE ที่เปลี่ยนแปลงตามความผันผวนของอิทธิพลจากปฏิกิริยาสุริยะ (Solar activities) เช่น จุดดับบนดวงอาทิตย์ หรือสัญญาณรบกวนคลื่นความยาว 10.7 เซนติเมตรที่แพร่มาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งค่าความผันผวนของตัวแปร

ต่างๆ เนื่องจากปฏิกิริยาสุริยะที่กล่าวมามีผลต่อการกำหนดระดับการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยรายปีของจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์และค่าดัชนีของสัญญาณรบกวนคลื่นความยาว 10.7 เซนติเมตรที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 [48]

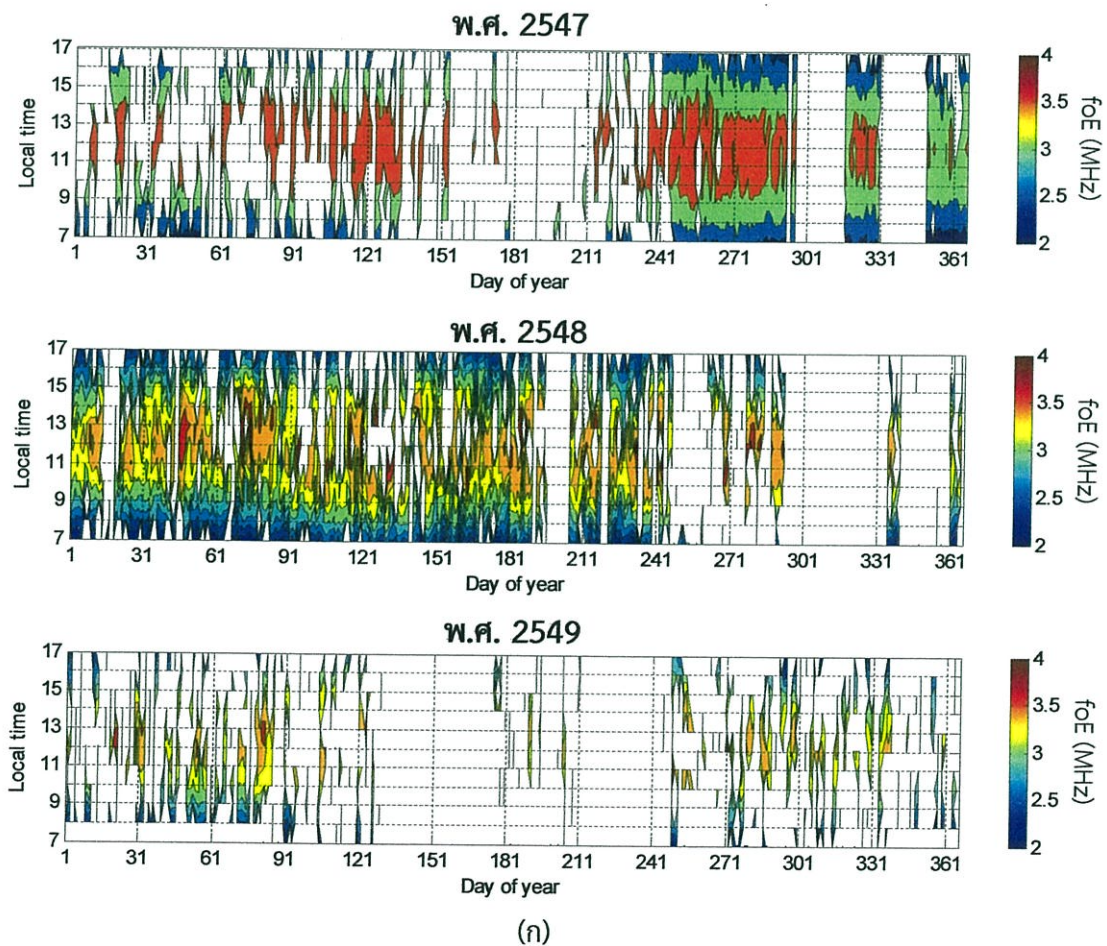
ตารางที่ 4.1 จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์และค่าดัชนีของคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตร ตั้งแต่ปี พ.ศ.2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 [48]

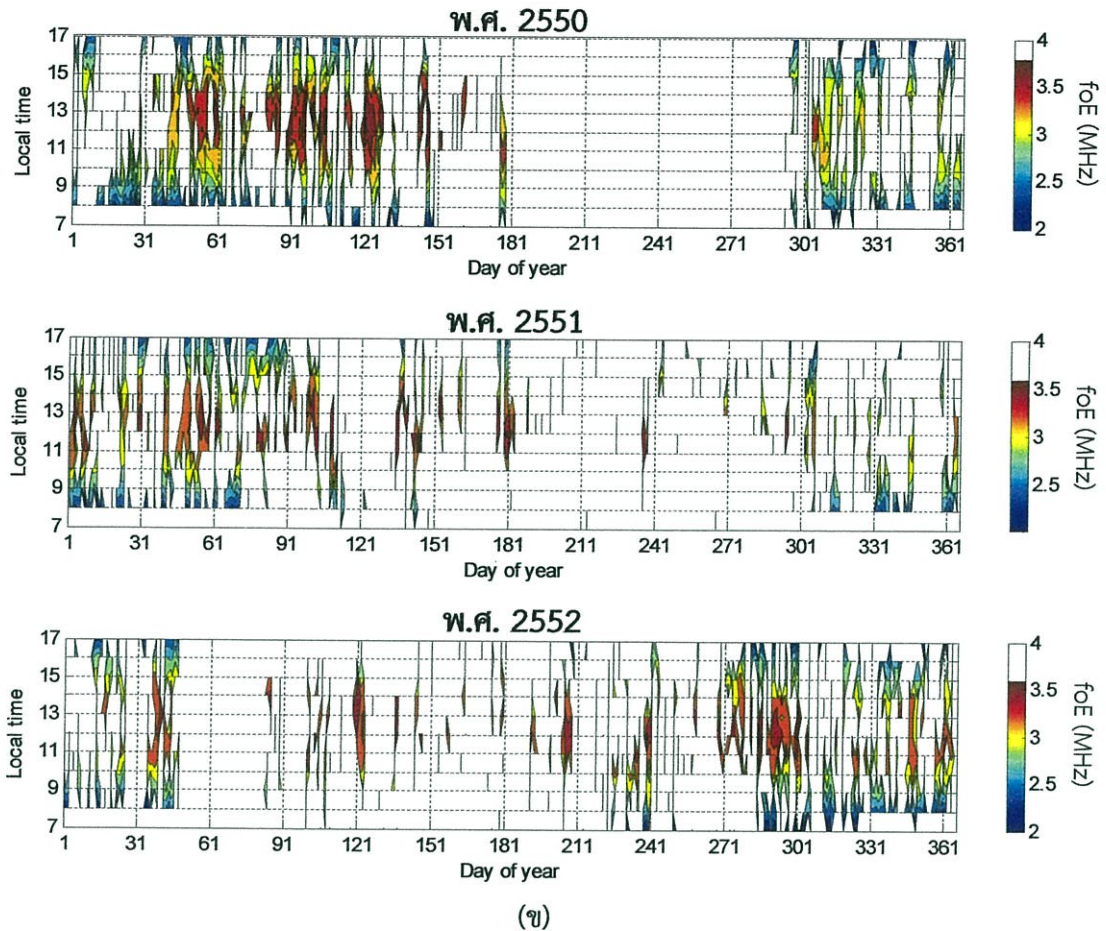
ปีที่ศึกษา	พ.ศ.2547	พ.ศ.2548	พ.ศ.2549	พ.ศ.2550	พ.ศ.2551	พ.ศ.2552
จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์	41	29	16	7	3	3
ค่าดัชนีของคลื่นความยาว 10.7 เซนติเมตร	94	85	76	71	69	69

จากรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) เส้นชั้นความสูง (Contour) แสดงระดับค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่พิจารณาจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่า foE ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในแต่ละวันแสดงให้เห็นว่าค่า foE ที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 ในรูปที่ 4.1 (ก) และค่า foE ที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2550 ถึงปี พ.ศ. 2552 ในรูปที่ 4.1 (ข) ระหว่างเวลาประมาณ 10.00 น. ถึง 14.00 น. เป็นช่วงที่เกิดการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศสูงสุดของแต่ละวันและปริมาณของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศมีสภาวะที่อิ่มตัวทำให้ค่า foE ที่แสดงด้วยแถบสีของเส้นชั้นความสูงในเวลาดังกล่าวมีความแตกต่างกันน้อยกว่าแถบสีของเส้นชั้นความสูงของค่า foE ที่วัดได้ก่อนเวลา 10.00 น. และหลังจากเวลา 14.00 น. เนื่องจากตำแหน่งการเคลื่อนตัวของดวงอาทิตย์เป็นตัวแปรผกผันที่มีผลต่อกระบวนการไอออไนซ์รวมถึงปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ในแต่ละวันทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาก่อน 10.00 น. และหลัง 14.00 น. มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแถบสีของเส้นชั้นความสูงของค่า foE ในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 9.00 น. และช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 17.00 น. มีความแตกต่างกันชัดเจนกว่าช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น.

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า foE ที่สามารถวัดได้ในเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคมตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2552 พบว่าความถี่วิกฤตสูงสุดเมื่อพิจารณาจากข้อมูลในแต่ละปีจะลดลงตามค่าดัชนีของคลื่นความยาว 10.7 เซนติเมตร โดยข้อมูลค่า foE ที่วัดได้สูงสุดสามารถวัดได้ในวันที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2547 มีค่าประมาณ 4 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งวัดได้เวลา 12.00 น.

นอกจากนี้ จะสังเกตว่าข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) มีบางช่วงเวลามีข้อมูลขาดหายไปนั้น มีสาเหตุเกิดจากภาพไอโอโนแกรมบางช่วงเวลาหรือบางวันไม่สามารถพิจารณาได้ รวมถึงส่วนหนึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ชั้นสเปเรติก-E ที่เป็นปัจจัยต่อการพิจารณาค่าตัวแปรค่า foE ที่เกิดขึ้นบนไอโอโนแกรม ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลปรากฏการณ์สเปเรติก-E จะอธิบายในบทถัดไป ส่วนอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่เกิดจากข้อจำกัดของช่วงความถี่ที่ถูกส่งออกไปวัดสภาพชั้นบรรยากาศถูกรบกวนจากการแทรกสอดของความถี่จากอุปกรณ์สื่อสารภายนอกที่ส่งผลต่อการพิจารณาค่าตัวแปรค่า foE บนภาพไอโอโนแกรมที่ต้องการศึกษา

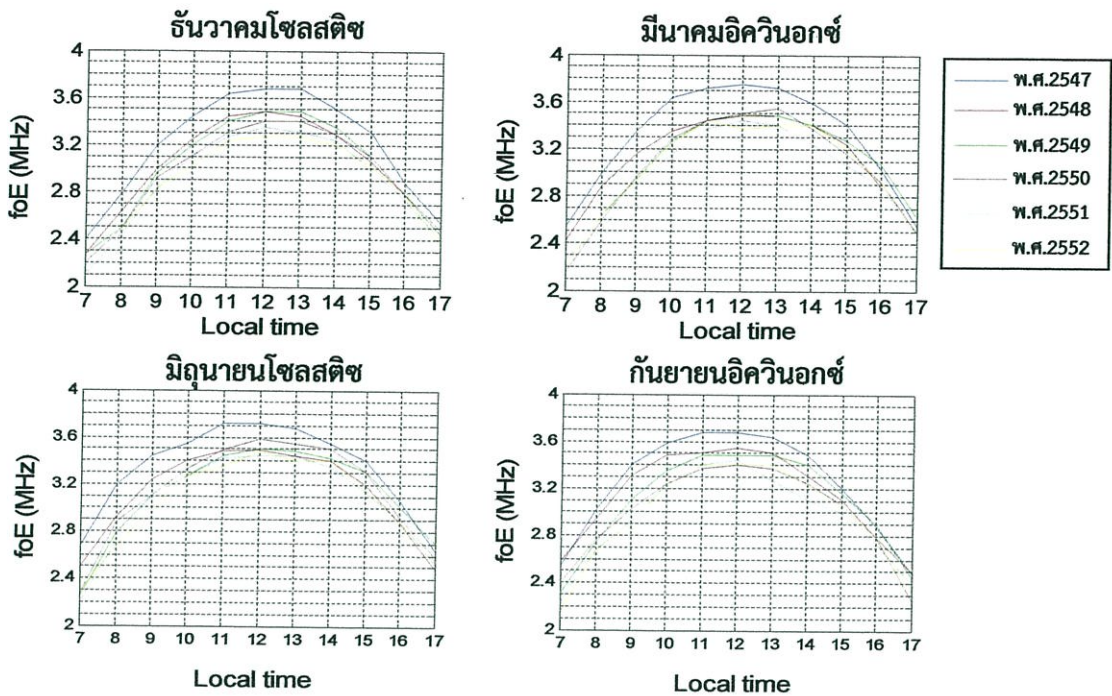




รูปที่ 4.1 ค่า foE ที่วัดได้แบบรายวัน (ก) พ.ศ. 2547-2549 (ข) พ.ศ. 2550-2552

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล

ผลจากการวิเคราะห์แนวโน้มค่า foE ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล เนื่องจากการเคลื่อนตัวของโลกรอบดวงอาทิตย์ทำให้ตำแหน่งมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์มายังโลก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาการแบ่งฤดูกาลออกเป็น 4 ฤดู ได้แก่ มีนาคมอิควินอกซ์ (March equinox), มิถุนายนโซลติส (June solstice), กันยายนอิควินอกซ์ (September equinox) และธันวาคมโซลติส (December solstice) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ค่า foE แบบฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552

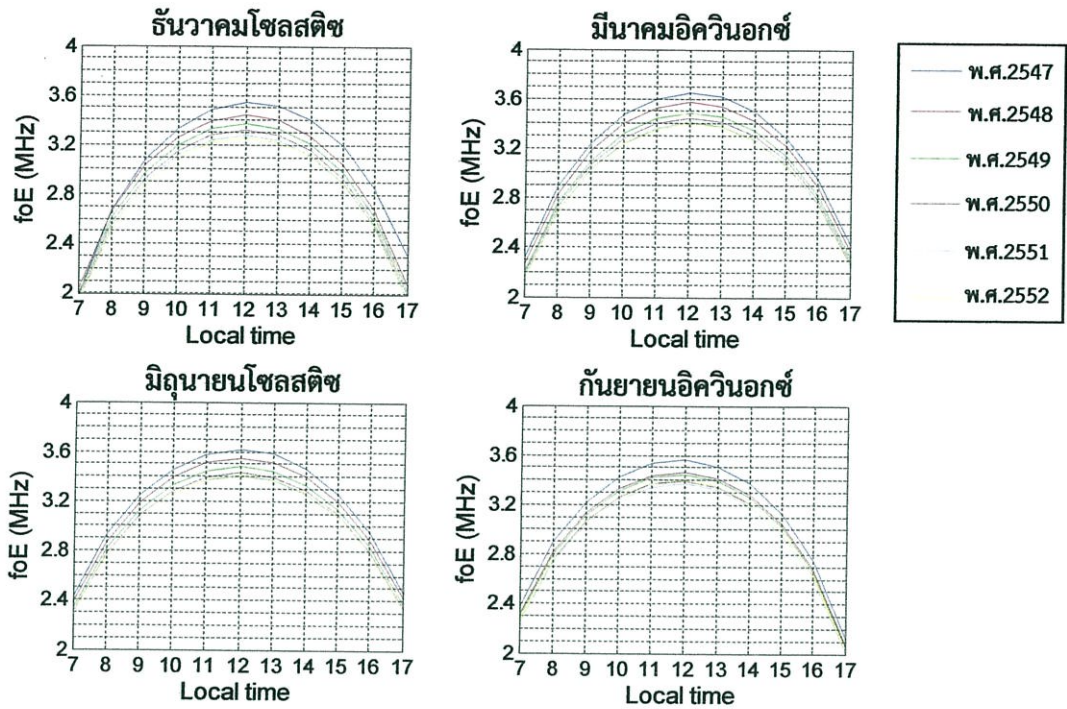
จากค่า foE ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้ในแต่ละฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 ที่แทนด้วยเส้นสีน้ำเงิน สีแดง สีเขียว สีม่วง สีฟ้าและสีเหลืองตามลำดับเป็นผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่า foE ที่วัดได้ในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 4.2 นั้น ค่า foE ที่วัดได้ในแต่ละฤดูตั้งแต่เวลา 7.00 น. มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งจะสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่เวลา 7.00 น. ในฤดูมิถุนายนโซลสติซของปี พ.ศ. 2547 และพ.ศ. 2548 โดยผลวิเคราะห์ค่า foE ที่พิจารณาได้จากผลการวิเคราะห์มีค่าสูงประมาณ 2.69 และ 2.51 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อเวลาผ่านไปแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า foE จะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 13.00 น. ของแต่ละฤดู และจากการสังเกตลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foE จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าที่เวลา 12.00 น. ในฤดูมีนาคมมิถุนายนอกซ์ของปี พ.ศ. 2547 ค่า foE ที่แสดงจากผลการวิเคราะห์มีค่า 3.79 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับฤดูอื่นการเปลี่ยนแปลงสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากฤดูกาลมีนาคมมิถุนายนอกซ์เป็นฤดูกาลที่เกิดความแปรปรวนจากการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากกว่าฤดูอื่น และหลังจากเวลา 13.00 น. จะเห็นได้ว่าผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่ได้ในแต่ละฤดูมีค่าลดลง โดยลักษณะการลดลงของค่า foE จนกระทั่งไม่สามารถวัดได้ในเวลา 17.00 น. ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 นั้น มีผลวิเคราะห์ค่า foE ที่ได้ใกล้เคียงกัน

กล่าวคือจากผลวิเคราะห์ค่า foE ที่ได้จากสภาพชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่ได้จากการวัดสภาพชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เป็นรูปแบบทั้งนี้ส่วนหนึ่งเกิดจากอิทธิพลของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยค่าปฏิกิริยาที่แสดงในตารางที่ 4.1 เป็นค่าเฉลี่ยของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่นำมาแสดงระดับความรุนแรงของผลกระทบดังกล่าวที่เกิดขึ้นในแต่ละปีที่ทำการศึกษา

#### 4.2 แบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานค่าความถี่วิกฤตชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ค่า foE ที่นำเสนอในหัวข้อต่อไปนี้เป็นผลจากการทำนายด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หรือแบบจำลอง IRI ที่ใช้พิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foE ตามฤดูกาลตั้งแต่เดือนมกราคมปี พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2552 โดยการพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง IRI ตามพิกัดของสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย แสดงแนวโน้มค่า foE ที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 4.3

โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foE ตามฤดูกาลที่แสดงจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ทำนายด้วยแบบจำลอง IRI ในรูปที่ 4.3 นั้น พบว่ามีลักษณะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่า foE ตามฤดูกาลที่วัดได้ กล่าวคือผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่เวลา 7.00 น. จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 น. หลังจากนั้นค่า foE จะลดลง แต่จากการสังเกตผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง IRI มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foE มีรูปแบบที่แตกต่างกันอย่างค่อนข้างชัดเจนในแต่ละฤดู ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าในฤดูอันหนาวเขตร้อนผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่เวลา 7.00 น. และเวลา 17.00 น. ผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่แสดงในรูปที่ 4.3 มีค่าต่ำกว่าฤดูอื่นส่วนที่เวลาเดียวกันในฤดูมฤถุนายนเขตร้อนผลการวิเคราะห์ค่า foE มีค่าสูงสุด นอกจากนี้ที่เวลา 12.00 น. ของฤดูมึนาคมิควินอกซ์แสดงให้เห็นผลการวิเคราะห์ค่า foE มีค่าสูงสุด ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ค่า foE ที่ทำนายด้วยแบบจำลอง IRI ที่นำเสนอในหัวข้อนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า foE ที่สามารถวัดได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่า foE ไปตามช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552

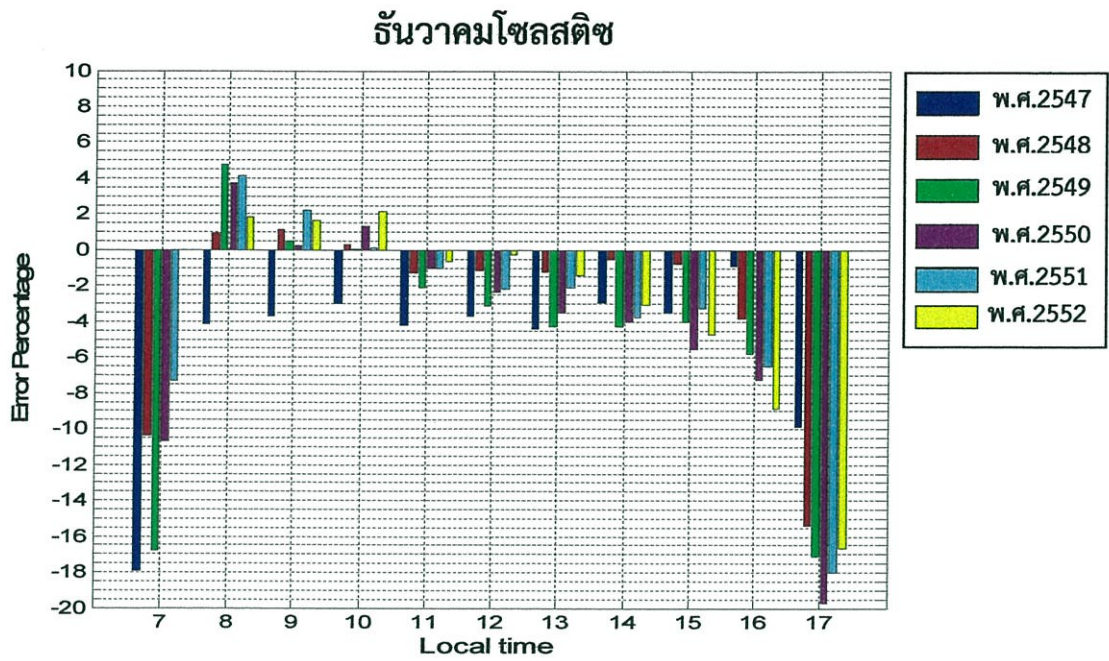


รูปที่ 4.3 ผลการทำนายค่า foEตามฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552

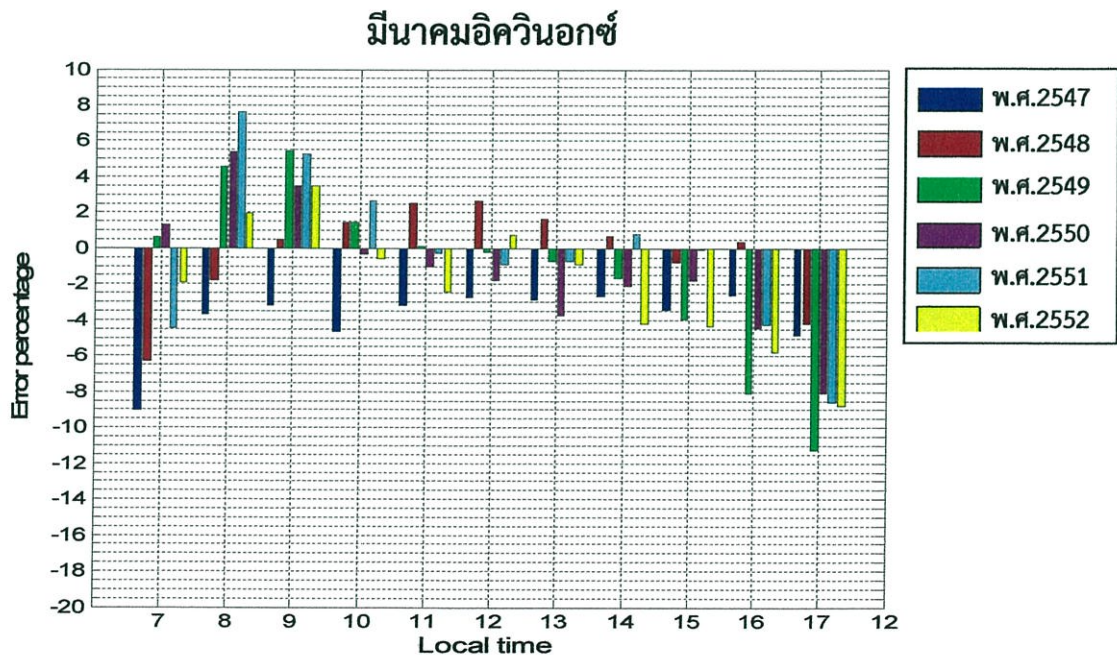
#### 4.3 ผลวิเคราะห์ความผิดพลาดระหว่างค่า foE ของแบบจำลอง IRI 2012 กับ foE ที่สามารถวัดได้จากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของความถี่วิกฤติชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ระหว่างแบบจำลอง IRI กับผลการวิเคราะห์สภาพชั้นบรรยากาศเหนือบริเวณสถานีชุมพร โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ถูกแสดงเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของข้อมูลค่า foE ตามเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 ที่แบ่งผลการวิเคราะห์ออกเป็นค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด 4 ฤดู และสรุปผลเป็นค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองระหว่างค่า foE ที่สามารถวัดได้เปรียบเทียบกับผลการทำนายค่า foE ด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐาน โดยแสดงเป็นค่าความผิดพลาดของข้อมูลในแต่ละฤดูดังนี้





(ก)

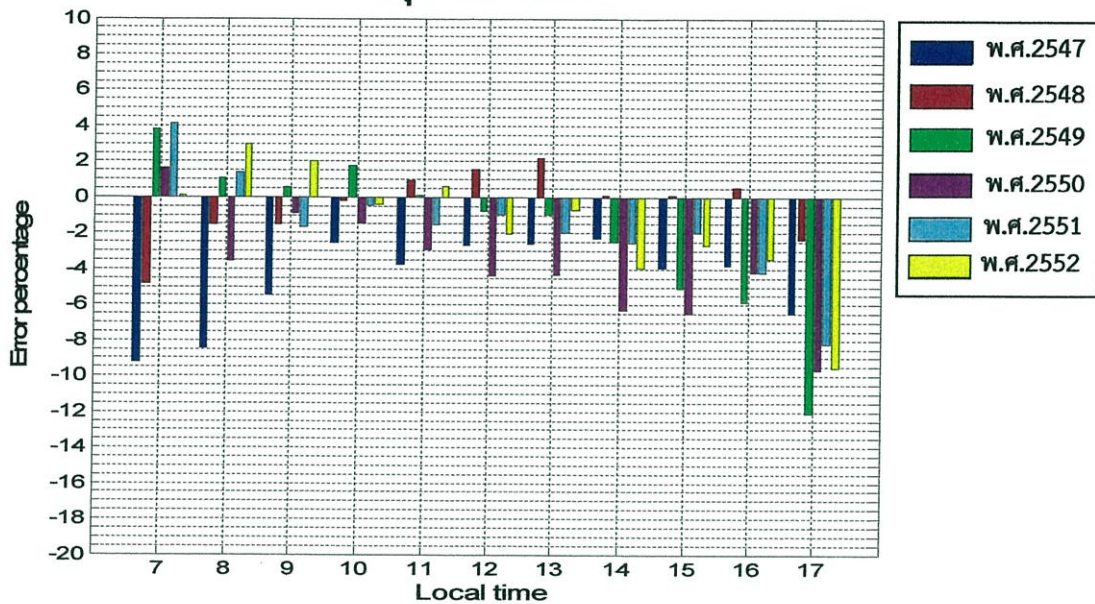


(ข)

รูปที่ 4.4 เปรอ์เซ็นต์ผิดพลาดระหว่างค่าความถี่วิกฤตชั้นไอที่ได้จากแบบจำลอง IRI 2012

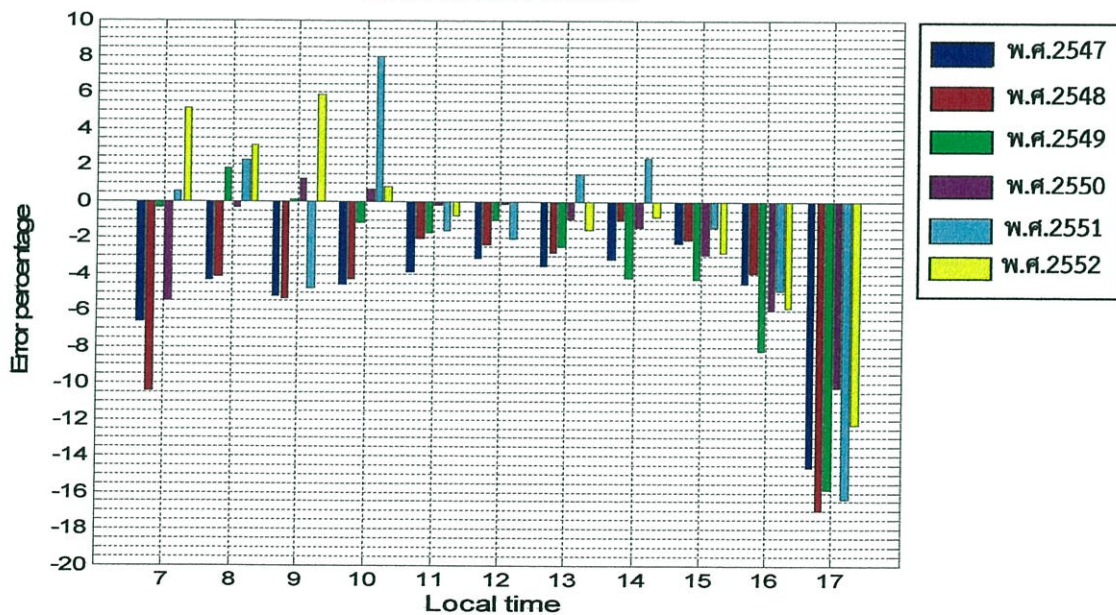
กับค่าความถี่วิกฤตชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถวัดได้

### มิถุนายนโซลสติซ



(ค)

### กันยายนอิควินอกซ์



(ง)

รูปที่ 4.4 (ต่อ)

#### 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

ผลการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองที่นำเสนอในหัวข้อนี้ เป็นการแสดงให้เห็นแนวโน้มความผิดพลาดที่คิดเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่า foE ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง IRI กับค่า foE ที่วัดได้จากชั้นบรรยากาศโอโซนสเฟียร์ในแต่ละฤดูในระหว่างเวลา 7.00น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 โดยผลการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองระหว่างค่า foE ที่ทำนายด้วยแบบจำลอง IRI เปรียบเทียบกับค่า foE ที่วัดได้แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่ามีความผิดพลาดเฉลี่ยจากข้อมูลทั้งหมด 0.012 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.2 ค่ารากที่สองของความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองระหว่างค่า foE ที่สามารถวัดได้

พิจารณาเปรียบเทียบกับค่า foE ที่ได้จากการทำนายด้วยแบบจำลอง IRI

ฤดูกาล	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE)					
	2547	2548	2549	2550	2551	2552
ธันวาคมโซลสติส	0.013	0.007	0.011	0.008	0.007	0.004
มีนาคมอิควินอกซ์	0.01	0.008	0.012	0.009	0.011	0.015
มิถุนายนโซลสติส	0.01	0.007	0.016	0.014	0.012	0.009
กันยายนอิควินอกซ์	0.009	0.029	0.013	0.031	0.02	0.012

จากการพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตัวแปร foE ในแต่ละฤดูพบว่าค่า foE ที่ทำนายด้วยแบบจำลอง IRI มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับค่า foE ที่วัดได้จากสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศชุมพร จะเห็นได้จากแนวโน้มของผลการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของฤดูธันวาคมโซลสติสในปี พ.ศ. 2552 แสดงผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลต่ำที่สุดได้ประมาณ 0.004 เมกะเฮิรตซ์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าในปีดังกล่าวมีปัจจัยจากการโอโซนสเฟียร์ในชั้นบรรยากาศและอิทธิพลของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำซึ่งทำให้แบบจำลอง IRI ทำนายค่า foE ได้ใกล้เคียงกับค่า foE ที่สามารถวัดได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองของแต่ละฤดูพบว่าแนวโน้มที่ไม่คงที่เนื่องจากปัจจัยจากการโอโซนสเฟียร์ในชั้นบรรยากาศของฤดูอิควินอกซ์ที่มีสภาวะการโอโซนสเฟียร์ที่มีความแปรปรวนสูงและฤดูมิถุนายนโซลสติสที่เป็นฤดูมีสภาวะการโอโซนสเฟียร์ในชั้นบรรยากาศสูงกว่าฤดูอื่น ซึ่งจากผล

การวิเคราะห์ดังที่กล่าวมาเป็นข้อมูลที่จะถูกนำเสนอเพื่อใช้ปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สำหรับการใช้งานที่เหมาะสมกับสภาพชั้นบรรยากาศภายในท้องถิ่น รวมถึงการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับลักษณะความผิดปกติที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น การเกิดชั้นสปอเรติก-E ที่เป็นผลกระทบต่อการสื่อสารคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยความผิดปกติดังกล่าวจะถูกนำเสนอผลการวิเคราะห์ในบทถัดไป

## บทที่ 5

# ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์การเปลี่ยนแปลง ของความถี่วิกฤติชั้นสพอเรติก-E

นอกจากแนวเส้นศูนย์สูตรทางภูมิศาสตร์แล้วโลกยังมีเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก ซึ่งสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่อยู่ภายในบริเวณละติจูดเหนือและต่ำกว่าตลอดแนวเส้นศูนย์สูตร สนามแม่เหล็ก 15 องศา พบว่ามีอิทธิพลที่ก่อให้เกิดความผิดปกติภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Equatorial Ionospheric Anomaly region) โดยทั่วไปจากการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่พิจารณาจากค่า foE แล้วนั้นยังพบปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอน จากการไอออไนซ์ที่ก่อตัวผิดปกติจากการพิจารณาค่าความถี่วิกฤติชั้น Es (foEs) ซึ่งจะเกิดขึ้น ในระดับความสูงใกล้เคียงกับชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลากลางวันรอบบริเวณ แนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกและเรียกลักษณะดังกล่าวว่าชั้นสพอเรติก-E ประเภทคว (q type sporadic-E) โดยทั่วไปชั้นสพอเรติก-E เป็นปรากฏการณ์เฉพาะบริเวณที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้และ ส่งผลทำให้เกิดการกระจายตัวของอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจาก กระบวนการยกตัวตามอิทธิพลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไอออไนซ์ภายในชั้นอีของบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ที่เคลื่อนตัวเหนือบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็ก ( $E \times B$ ) สำหรับการศึกษ ปรากฏการณ์ดังกล่าวพิจารณาจากค่าความถี่วิกฤติของชั้นสพอเรติก-E [11] ซึ่งพบว่าในบางครั้ง การเกิดขึ้นสพอเรติก-E เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการสื่อสารในด้านของการบดบังคลื่นในย่าน HF ที่ถูกแพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และรวมถึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหัน ทางขนาดของสัญญาณดาวเทียม (Scintillation) [14] ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลง ของค่า foEs ในช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 ที่สามารถบันทึกได้ที่สถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรจะถูกนำมาวิเคราะห์เป็นแบบรายวันและตามฤดูกาล

เพื่อพิจารณาลักษณะความแปรปรวนของชั้นสพอเรติก-E จากค่าความเบี่ยงเบนของ foEs ที่เกิดขึ้นในแต่ละฤดูกาล

### 5.1 ผลการวิเคราะห์ค่าความถี่วิกฤติชั้นสพอเรติก-E

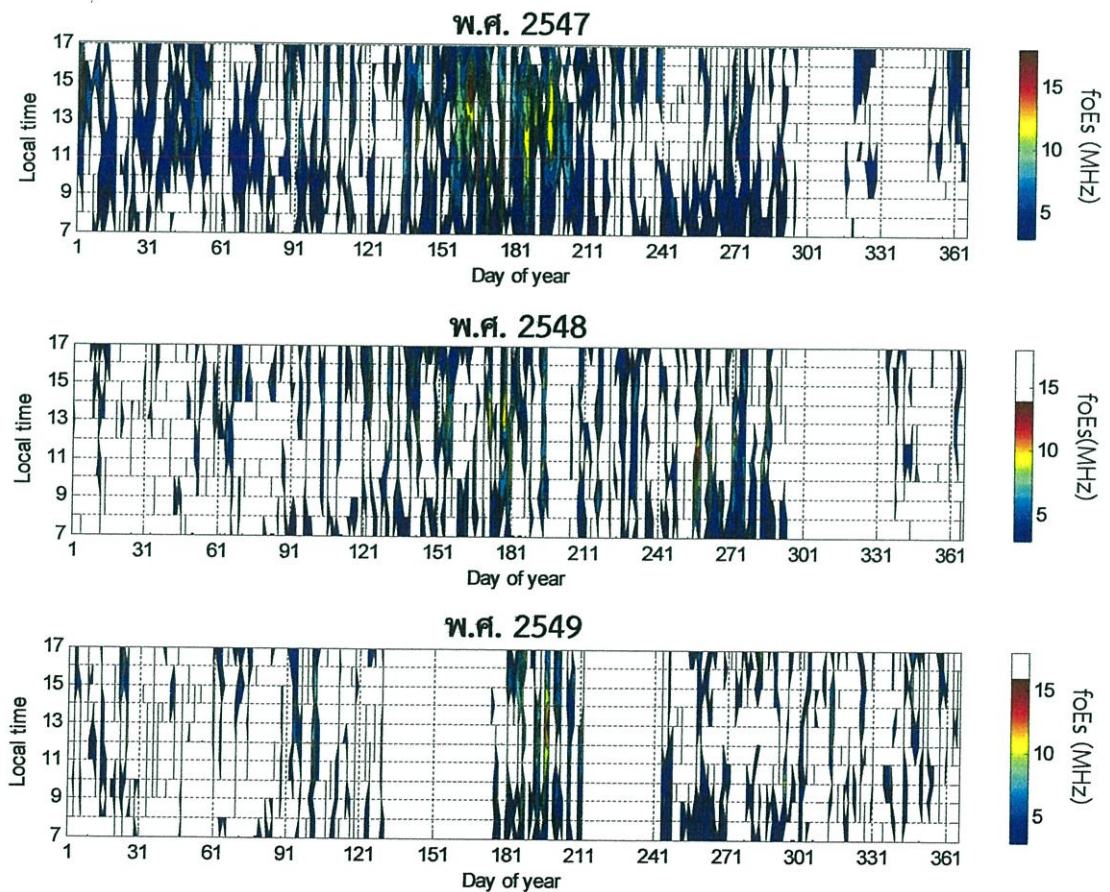
การเปลี่ยนแปลงของค่า foEs ที่สามารถวัดได้เหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 ระหว่างเวลา 7.00 น. ถึง 17.00 น. แสดงให้เห็นแนวโน้มที่บ่งชี้ถึงความรุนแรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันของสัญญาณดาวเทียมที่ส่งผ่านบริเวณที่เกิดชั้นสพอเรติก-E ดังนั้นจากการวิเคราะห์ค่า foEs ที่วัดได้จะแสดงให้เห็นลักษณะแนวโน้มการเกิดชั้นสพอเรติก-E ประเภทที่ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศจังหวัดชุมพรแบบรายวันและแบบฤดูกาล ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

#### 5.1.1 ผลการวิเคราะห์ค่า foEs ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน

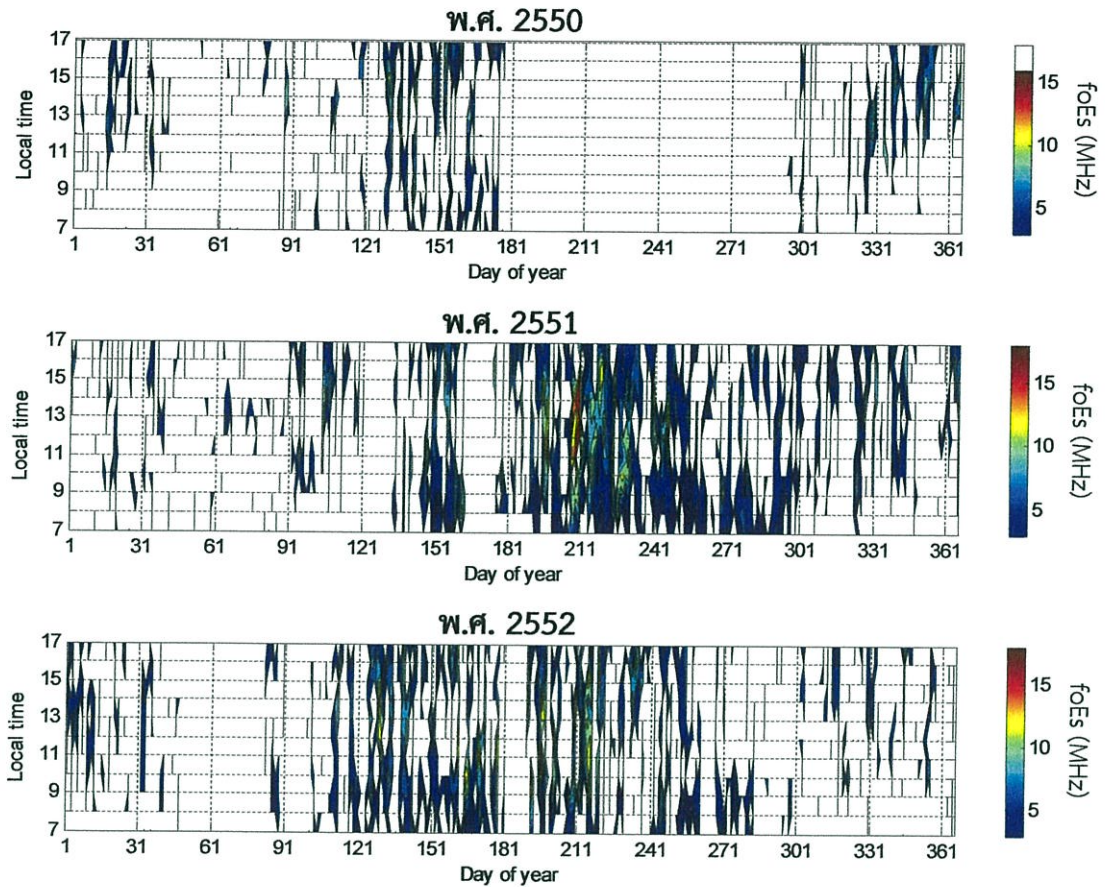
ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของตัวแปร foEs เป็นแนวโน้มของค่าความถี่สูงสุดที่สามารถวัดได้จากชั้นสพอเรติก-E ซึ่งพิจารณาจากภาพไอโอโนแกรมทุก 15 นาทีและพิจารณาผลวิเคราะห์ข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงโดยแถบสีเส้นชั้นความสูงของค่า foEs ในรูปที่ 5.1 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่า foEs ที่บ่งชี้ที่แสดงถึงระดับความแปรปรวนที่เกิดขึ้นภายในชั้นอ้อของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดจากชั้นสพอเรติกประเภทใดในแต่ละวันระหว่างช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552

ซึ่งจากผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่า foEs ในแต่ละวันพบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 7.00 น. ถึงเวลา 10.00 น. ผลการวิเคราะห์ค่า foEs ที่เวลาดังกล่าวนั้นส่วนใหญ่วัดได้เฉลี่ยแล้วตัวแปร foEs ที่วัดได้ในแต่ละปีมีค่าประมาณ 4 เมกะเฮิร์ตซ์จากแนวโน้มค่า foEs ที่วัดได้ในช่วงเวลาดังกล่าว แสดงลักษณะความแปรปรวนที่พิจารณาจากความถี่วิกฤติของชั้นสพอเรติก-E มีค่าไม่รุนแรงมากเมื่อเทียบกับค่า foEs ที่วัดได้ในช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 11.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ซึ่งพบว่าความแปรปรวนของค่าความถี่วิกฤติที่วัดได้จากชั้นสพอเรติก-E มีการเปลี่ยนแปลงที่สามารถวัดได้เฉลี่ย 10 เมกะเฮิร์ตซ์ในช่วงเวลาดังกล่าวโดยจะเห็นได้ว่าค่า foEs สูงสุดที่สามารถวัดได้ในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 16.00 น. ของวันที่ 150 ถึงวันที่ 220 ในปี พ.ศ. 2547 พ.ศ. 2551 และ พ.ศ. 2552 แถบสีของเส้นชั้นความสูงแสดงค่า foEs มีการเปลี่ยนแปลงที่สูงสุดถึงประมาณ 20 เมกะเฮิร์ตซ์ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงของค่า foEs

ที่สามารถวัดได้เกิดจากกลไกทางกายภาพของตำแหน่งดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในแต่ละวัน มีผลต่อการกระตุ้นกระบวนการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศรวมถึงปัจจัยจากสนามแม่เหล็กโลก ที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งซึ่งมีผลต่อปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์ที่กระจายตัวอยู่ในชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้ค่า foEs ที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงแบบที่ไม่สามารถคาดการณ์เวลาการเกิดและความรุนแรงของการเกิดปรากฏการณ์สพอเรติก-E ได้นอกจากนี้ความรุนแรงจากค่า foEs ที่สามารถวัดได้จากชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เนื่องจากการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอยังมีแนวโน้มที่เป็นไปได้ว่าจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางขนาดของสัญญาณดาวเทียม เนื่องจากความหนาแน่นของชั้นสพอเรติก-E รวมถึงจะทำให้เกิดการบังความถี่ในย่าน HF ที่ถูกแพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



(ก)

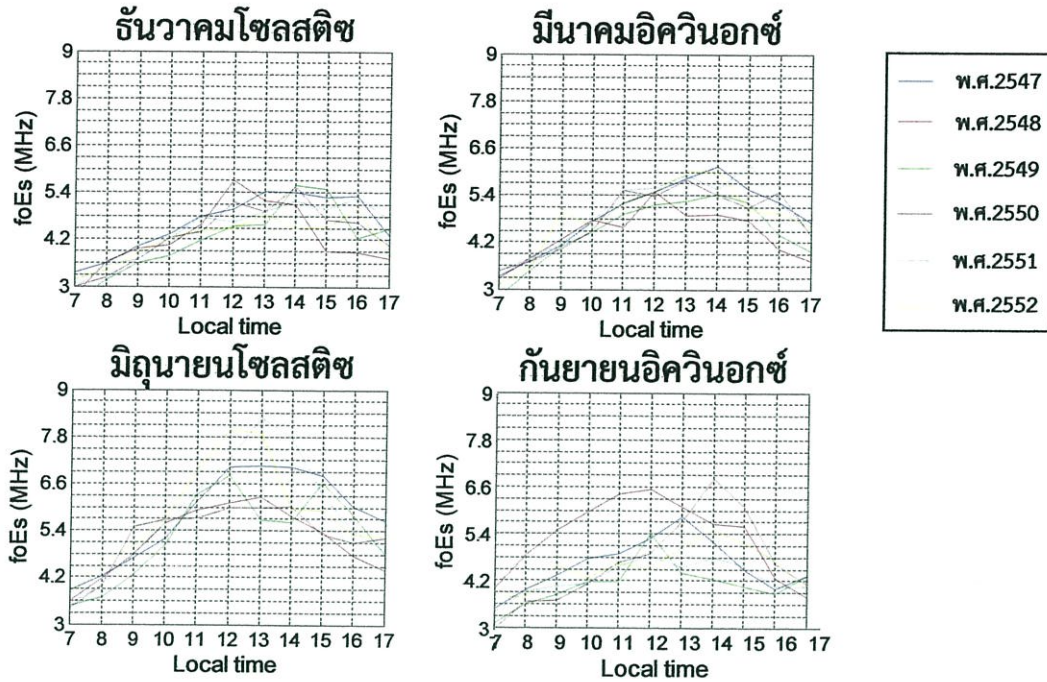


(ข)

รูปที่ 5.1 ค่า foEs แบบรายวัน (ก) พ.ศ. 2547-2549 (ข) พ.ศ. 2550-2552

### 5.1.2 การวิเคราะห์ค่า foEs ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล

จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า foEs ที่ได้จากผลวิเคราะห์ความถี่วิกฤติชั้นสเปเรติก-E ในแต่ละวันในเหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์หัวข้อต่อไปนี้จะแสดงแนวโน้มความรุนแรงของค่า foEs โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละปีแบ่งเป็นการพิจารณาฤดูกาลทั้งหมด 4 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน ฤดูหนาว และ ฤดูร้อน โดยจะพิจารณาถึงแนวโน้มความหนาแน่นของชั้นสเปเรติก-E เพื่อพิจารณาถึงลักษณะการเกิดรวมถึงแนวโน้มความหนาแน่นของชั้นสเปเรติก-E จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่า foEs ที่สามารถวัดได้โดยแสดงในรูปที่ 5.2

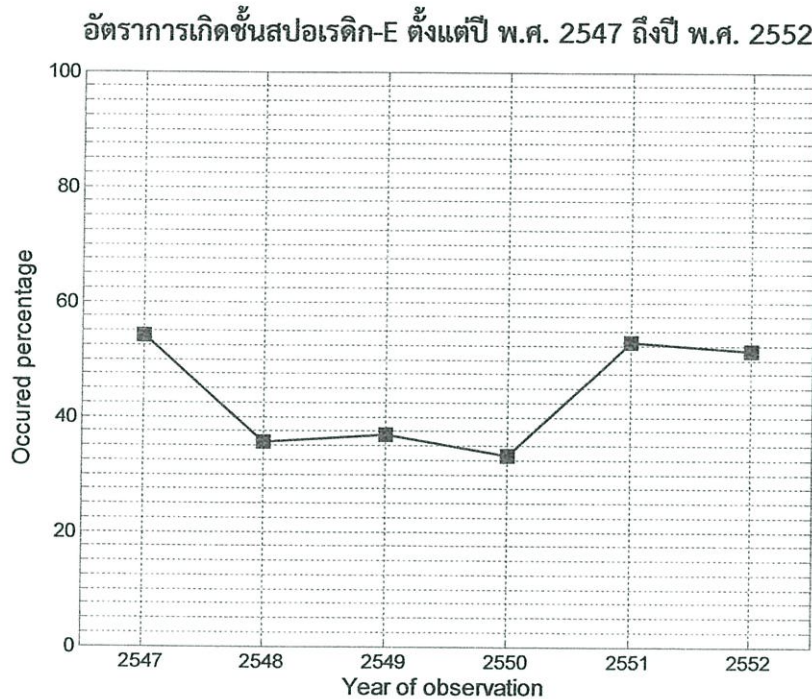


รูปที่ 5.2 ผลวิเคราะห์ค่า  $f_oE_s$  แบบฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552

จากการพิจารณาค่า  $f_oE_s$  ที่พบในรูปที่ 5.2 จะสังเกตได้ว่าลักษณะแนวโน้มความถี่วิกฤติที่วัดได้ในช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 10.00 น. ของแต่ละฤดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $f_oE_s$  จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันเนื่องจากกระบวนการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศยังถูกกระตุ้นจากดวงอาทิตย์ยังไม่สมบูรณ์แต่หลังจากเวลา 11.00 น. ซึ่งเป็นช่วงอ้อมตัวของกระบวนการไอออไนซ์ของทุกฤดูจะเห็นว่าผลการวิเคราะห์ค่า  $f_oE_s$  สูงสุดในแต่ละฤดูที่พิจารณาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงเวลา 12.00 น. ถึงเวลา 16.00 น. โดยเฉพาะในฤดูมิถุนายนโซลสติชพบว่าค่า  $f_oE_s$  ที่วัดได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 14.00 น. ซึ่งเวลาดังกล่าวมีการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศสูง

จากข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์พบว่า อัตราการเกิดชั้นสเปเรติก-E ภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เหนือสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศภายในสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ระหว่างเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 มีค่าเฉลี่ยของการเกิดของปรากฏการณ์

ชั้นสพอเรติก-E ตลอดทั้งปีคิดเป็น 44.15 เปอร์เซ็นต์ โดยในรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดสะสมของชั้นสพอเรติก-E ของปี พ.ศ. 2547 เป็นปีที่มีอัตราการเกิดชั้นสพอเรติก-E มากที่สุด นอกจากนี้ในปี พ.ศ. 2551 และปี พ.ศ. 2552 ยังพบว่าอัตราการเกิดของชั้นสพอเรติก-E มีค่าใกล้เคียงกับอัตราการเกิดของชั้นสพอเรติก-E ของปี พ.ศ. 2547



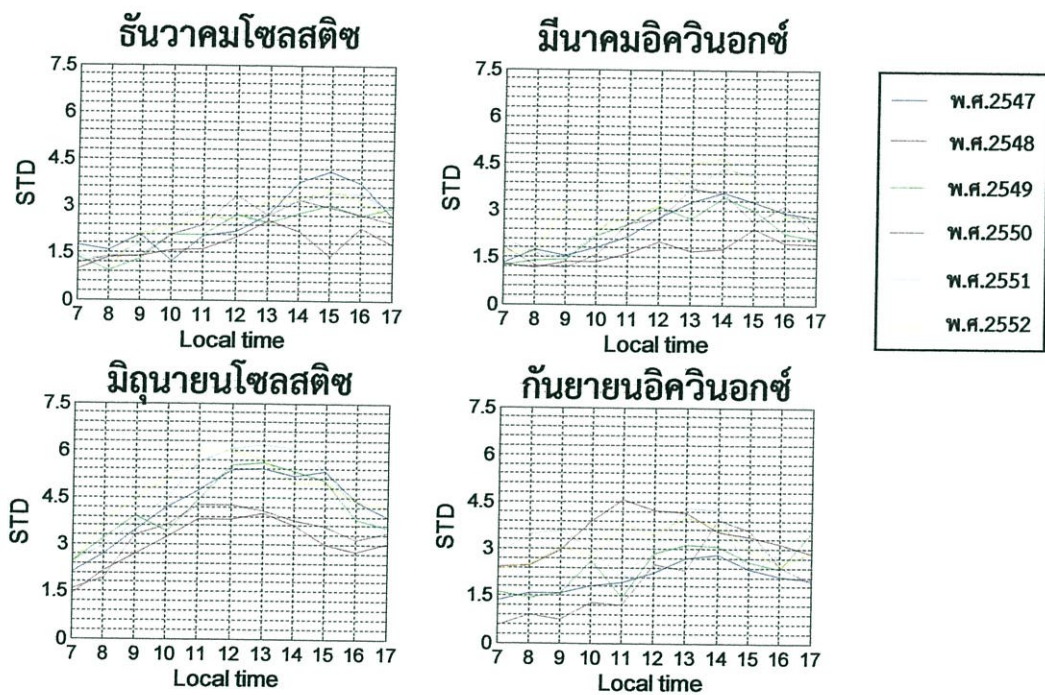
รูปที่ 5.3 เปอร์เซ็นต์การเกิดสพอเรติก-E ในแต่ละปีตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552

## 5.2 ผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า foEs ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ที่แสดงในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์แนวโน้มการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลตัวแปร foEs ที่มีการเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยของตัวแปร foE ในแต่ละฤดูที่ได้จากการวัดสภาพชั้นไอโอโนสเฟียร์ในบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคมปี พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคมปี พ.ศ. 2552 โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นในแต่ละฤดูกาลจะทำการพิจารณาตามสมการที่ (5.1) ซึ่งในสมการนี้ตัวแปรซิกม่า  $\sigma$  คือค่าความเบี่ยงเบนของความถี่วิกฤติชั้นสพอเรติก-E รายชั่วโมงในแต่ละฤดูระหว่างปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 สำหรับตัวแปร  $foEs_{obs}$  คือค่าความถี่วิกฤติชั้นสพอเรติก-E ที่สามารถวัดได้ในแต่ละฤดู

ซึ่งถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวแปร  $foE_{median}$  คือค่าเฉลี่ยของความถี่วิกฤตชั้นไอตามฤดูที่พิจารณา ส่วน  $N$  คือ จำนวนข้อมูลของค่า foEs ในแต่ละฤดูที่ทำการพิจารณา โดยผลการวิเคราะห์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า foEs เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย foE ตามฤดูที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 5.4

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{obs=1}^N (foEs_{obs} - foE_{median})^2} \quad (5.1)$$



รูปที่ 5.4 แนวโน้มความเบี่ยงเบนของค่า foEs ตามฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552

ในรูปที่ 5.4 เป็นผลวิเคราะห์ความแปรปรวนค่า foEs ซึ่งเป็นค่าความถี่วิกฤตของชั้นสเปกตรัม-E ซึ่งถูกนำไปพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า foE ที่เป็นค่าเฉลี่ยความถี่วิกฤตชั้นไอตามเวลาของแต่ละฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 ที่แสดงให้เห็นระดับความแปรปรวนของค่า foEs ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตามฤดูกาลในแต่ละปีที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน ทั้งนี้จากค่าความแปรปรวนของชั้นสเปกตรัม-E ที่พิจารณาจากค่า foEs ระดับความเปลี่ยนแปลงของค่า foEs ที่สามารถวัดได้นั้นเกิดจากปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอน

ที่กระจุกตัวอย่างหนาแน่นมากกว่าชั้นอ้อของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ปกติและจากแนวโน้มดังกล่าวที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ว่าความหนาแน่นของกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในขณะนั้นจะส่งผลให้ขนาดของสัญญาณดาวเทียมที่ผ่านมายังบริเวณที่เกิดขึ้นสพอเรติก-E หนาแน่นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางขนาดของสัญญาณดาวเทียมหรือปรากฏการณ์ซินทิลเลชัน ซึ่งเกิดจากการกระจายตัวของสัญญาณดาวเทียม ดังนั้นจากการพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนของชั้นสพอเรติก-E ที่สามารถวัดได้จากความถี่วิกฤติในฤดูต่างๆ จะพบว่าแนวโน้มความรุนแรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสัญญาณดาวเทียมมีช่วงเวลาที่ต่างกัน เช่น ในฤดูธันวาคมโซลสติคค่าความเบี่ยงเบนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 13.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ในฤดูมีนาคมอิควินอกซ์ค่าความเบี่ยงเบนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 16.00 น. ในฤดูมิถุนายนโซลสติคค่าความเบี่ยงเบนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 15.00 น. และในฤดูกันยายนอิควินอกซ์ค่าความเบี่ยงเบนมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 15.00 น. นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความเบี่ยงเบนของค่าความถี่วิกฤติชั้นสพอเรติก-E ในฤดูกันยายนอิควินอกซ์เกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2551 มีแนวโน้มที่เป็นไปได้ว่าอาจจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกระทันหันทางขนาดของสัญญาณดาวเทียม เมื่อพิจารณาจากค่าความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นสองช่วงเวลาคือ ระหว่างเวลา 8.00 น. ถึงเวลา 9.00 น. และเวลา 13.00 น. ถึงเวลา 14.00 น.

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในชั้นไอของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สำหรับใช้ในการสื่อสารนั้น แบบจำลองที่มีความแม่นยำเป็นสิ่งสำคัญต่อการพิจารณาเพื่อใช้งาน นอกจากนี้การศึกษาปรากฏการณ์ความผิดปกติภายในชั้นบรรยากาศเช่นชั้นสโปเรติก-E ที่เกิดขึ้นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นปรากฏการณ์อย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อ การสื่อสารที่ถูกแพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของกลุ่มความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เกิดจากปรากฏการณ์ชั้นสโปเรติก-E อาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางขนาดของสัญญาณดาวเทียมที่แพร่กระจายผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นที่มาของปัญหาซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ดังนั้นวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการศึกษา รูปแบบหรือลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศเพื่อนำไปใช้ปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถทำนายความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานชั้นบรรยากาศเป็นช่องสัญญาณ รวมถึงลักษณะความผิดปกติของชั้นสโปเรติก-E ประเภทคิว โดยพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจากค่าความถี่วิกฤตชั้นอี (foE) และค่าความถี่วิกฤตของชั้นสโปเรติก-E (foEs) ที่วิเคราะห์จากภาพไอโอโนแกรมตามขั้นตอนที่อธิบายในบทที่ 3 ซึ่งภาพไอโอโนแกรมที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศเป็นข้อมูลสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดด้วยเทคนิคไอโอโนโซนดที่มีหลักการทำงานตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 2 และจากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 4 แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรค่า foE ที่สามารถวัดได้เหนือบริเวณสถานีวัดสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ตั้งอยู่ในบริเวณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพรประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณเหนือแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลก 3 องศา โดยทำการพิจารณาข้อมูลในช่วงเวลา 7.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีอิทธิพลของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ เช่น จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์หรือสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรมีค่าลงจนถึงจุดต่ำสุดของรอบวัฏจักร สามารถสรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร foEที่สามารถวัดได้ตั้งแต่เวลา 7.00น. จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ถึงเวลา 13.00 น. หลังจากนั้นค่าตัวแปร foE ที่วัดได้จะลดลงจนกระทั่งถึงเวลา 17.00 น. ทั้งนี้เนื่องจากความเบาบางของปริมาณอิเล็กตรอนที่ไอออไนซ์หลังเวลา 17.00 น. ทำให้ไม่สามารถพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางคืนด้วยเทคนิคไอโอโนโซนด์และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า foE ที่เกิดขึ้นใน 4 ฤดูกาลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2552 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร foE ที่สามารถวัดได้มีการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกันและลดลงผกผันตามจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์หรือดัชนีค่าสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุความยาว 10.7 เซนติเมตรที่มีแนวโน้มลดลง และจากการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ค่าตัวแปร foE ที่ทำนายด้วยแบบจำลองอ้างอิงมาตรฐานชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับค่าตัวแปร foE ที่วัดได้พบว่าที่เวลา 7.00 น. ถึงเวลา 8.00 น. และเวลา 16.00 น. ถึงเวลา 17.00 น. มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมากกว่าช่วงเวลาอื่น และจากการพิจารณาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองพบว่าฤดูกาลกันยายนออกซิควินอกซ์มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าฤดูกาลอื่น

ส่วนในบทที่ 5 เป็นการนำเสนอลักษณะความผิดปกติของชั้นอีของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ภายในบริเวณแนวเส้นศูนย์สูตรสนามแม่เหล็กโลกเรียกว่าชั้นสพอเรติก-E ประเภทคิว หรือค่าตัวแปร foEs จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่พิจารณาได้พบว่าเป็นระหว่างวันที่ 151 ถึงประมาณวันที่ 211 ของแต่ละปีเป็นช่วงที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร foEs สูงที่สุด และเมื่อทำการพิจารณาค่าตัวแปร foEs ในแต่ละฤดูกาลพบว่าแนวโน้มการเกิดชั้นสพอเรติก-E มีลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปร foEs ในฤดูมิถุนายนโซลสติซสูงกว่าฤดูอื่นเนื่องจากฤดูดังกล่าวมีช่วงเวลากลางวันนานกว่าฤดูอื่นทำให้เกิดการไอออไนซ์ภายในชั้นบรรยากาศมากกว่าปกติ โดยความผิดปกติที่พิจารณาได้จากตัวแปร foEs เมื่อนำไปพิจารณาเทียบกับค่าเฉลี่ยของตัวแปร foE ของแต่ละฤดูด้วยวิธีการหาค่าความเบี่ยงเบนก็จะทำให้เห็นลักษณะแนวโน้มความแปรปรวนของการเกิดชั้นสพอเรติก-E ซึ่งพบว่าแนวโน้มความแปรปรวนของเกิดชั้นสพอเรติก-E ที่ค่อนข้างสูงในช่วงเวลา 12.00 น. ถึงเวลา 16.00 น. โดยเฉพาะในฤดูมิถุนายนโซลสติซพบว่าค่า foEs ที่สามารถวัดได้มีค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงในช่วงเวลา 11.00 น. ถึงเวลา 14.00 น. ส่วนในฤดูออกซิควินอกซ์คือมีนาคมและกันยายนจะสังเกตว่าลักษณะความแปรปรวนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่ไม่แน่นอนและจากลักษณะความแปรปรวนจากค่าตัวแปร foEs ที่รุนแรงนั้นเป็นไปได้ว่า

มีความเกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียมที่แพร่กระจายผ่านบริเวณดังกล่าวเนื่องจากความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมออยู่ในชั้นสพอเรติก-E

ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย นอกจากการศึกษาลักษณะความถี่ที่เหมาะสมต่อการใช้แพร่กระจายคลื่นในลักษณะคลื่นฟ้า (Sky wave) ควรจะมีการศึกษาถึงลักษณะความผิดปกติหรือความแปรปรวนภายในชั้นบรรยากาศเช่นการเกิดชั้นสพอเรติก-E โดยการเก็บผลของสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อพิจารณาแนวโน้มรวมถึงการทำแบบจำลอง สำหรับใช้ประเมินผลกระทบต่อพิจารณาค่าชดเชยในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันของสัญญาณดาวเทียม เนื่องจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของสัญญาณที่ผ่านชั้นสพอเรติก-E ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อระบบการนำร่องที่ต้องมีการแพร่กระจายสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ นอกจากนี้ยังมีความผิดปกติจากการเคลื่อนตัวของกระแสไฟฟ้าภายในชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการสื่อสารอีกเช่นกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Blaunstein, N. and Plohotniuc, E. 2008. **Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar**. Boca Raton : Taylor & Francis Group.
- [2] Plendl H. "Concerning the Influence of Eleven-year of Solar Activity Period upon the Propagation of Wave in Wireless Technology." **Proc. Inst. Radio Eng.**, Vol. 20, 1932, pp. 520-539
- [3] Kaiser T.R. "The First Suggestion of an Ionosphere." **J. Atmos. Terr. Phys.**, Vol. 24, 1962, pp. 865-872
- [4] Kouris S.S. and Muggleton L.M. "Diurnal Variation in E-layer Ionization." **J. Atmos. Terr. Phys.**, Vol.35, Issue 1, 1973a, pp. 133-139
- [5] Kouris, S.S. and Muggleton, L.M., "World Morphology of Appleton E-layer Seasonal Anomaly." **J. Atmos. Terr. Phys.**, Vol.35, Issue 1, 1973b, pp. 141-151
- [6] Rastogi R.G. and Mullen J. "Intense Daytime Radio Wave Scintillations and Sporadic E layer near the dip Equator." **J. Geophys. Res.**, Vol.86, Issue A1, 1981. pp. 195-198
- [7] Yamamoto, M. et. al. "Mid latitude E region Field-aligned Irregularities Observed with the MU radar." **J. Geophys. Res.**, Vol.96, Issue A9, 1991. pp. 15943-15949
- [8] Yamamoto, M. et. al. "A morphological Study of Mid-latitude E-region Field-aligned Irregularities Observed with the MU radar." **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, Vol.54, 1992, pp. 769-777
- [9] Abe O.E., Rabiou A.B. and Adenniyyi J.O. "Variation of foE in Equatorial Ionosphere with Solar Activity." **Adv. Space Res.**, Vol.51, 2013. pp. 69-75
- [10] Kagan L.M., Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Tolmacheva A.V. and Kelley M.C. "Structure and Dynamics of Sporadic layers of Ionization in the Ionospheric E region" **Radio science**, Vol.37, No.6, Dec. 2002, pp. 18-1-18-12

- [11] Rastogi R.G. "Equatorial Sporadic E and Cross-field Instability." *Proc. Indian Acad Sci.Sec. A.*, Vol.76, No. 5, 1972. pp. 181-194
- [12] Koparkar P.V., Rastogi R.G. and Sastri J.H. "Daytime Equatorial VHF Radiowave Scintillation and Sporadic-E layer" *Indian Journal of Radio and Space Physics*, Vol 18, 1989. pp. 121-124
- [13] Chandra H., Vats H. O., Sethia, G., Deshpande M. R., Rastogi R. G., Sastri J. H., and Murthy B. S. "Ionosphere Scintillations Associated with Features of Equatorial Ionosphere." *Annales De Geophysique.*, Vol. 35. No. 3. 1979. pp. 145-151
- [14] Zeng Z., and SokolovskiyS., "Effect of Sporadic E Clouds on GPS Radio Occultation Signals." *Geophysical Research Letters.*, Vol.37.18, 2010.
- [15] Wongcharoen P., Supnithi P., Noppanakeepong S. and Lerkvaranyu S. "Comparison of Critical Frequency of Elayer Over Chumphon, Thailand with IRI 2007 Model" *Proc. iEECON, Chiangmai, Thailand, March 2013.* pp. 269-271
- [16] Wongcharoen P., Kenpankho P., Sepsirisuk K., Supnithi P., Noppanakeepong S., Lerkvaranyu S., Tsugawa T. and Nagatsuma T. "The Variation of Critical Frequency of E layer over the Magnetic Equatorial Region, Chumphon, Thailand" *Proc. IconSpace, Melaka, Malaysia, July 2013*pp. 198-201
- [17] Kelley, M.C. 1989.*The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics.* London : ACADEMIC PRESS, INC.
- [18] สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท).2550. <sup>๕</sup>ชั้นบรรยากาศ.  
[Online].Available :<https://www.youtube.com/watch?v=9H4AnyBz-5k>
- [19] Collin, R.E.1985.*Antenna And Radiowave Propagation.* Singapore : Singapore National Printers (Pte) Ltd.
- [20] Ondoh T. and Marubashi K. 2000. *Science of Space Environment.* Tokyo : Ohmsha, Ltd.

- [21] British Geological Survey. 2015. **Geomagnetism**.  
 [Online].Available : [http://www.geomag.bgs.ac.uk/images/charts/jpg/merc\\_i.jpg](http://www.geomag.bgs.ac.uk/images/charts/jpg/merc_i.jpg)
- [22] Phong, P.L.H. "Scintillation effects on GPS signal and TEC model based on neural network." Master of Engineering in Computer Engineering International College, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. 2012.
- [23] Hall, M.P.M. Barclay, L.W. and Hewitt, M.T. 1996. **Propagation of radiowaves**.  
 London : Short Run Press Ltd.
- [24] Ratcliffe, A.J. 1972.**An introduction to the ionosphere and magnetosphere**.  
 Cambridge : Cambridge University Press.
- [25] Science Explore. **The Sun Part 6: Photosphere and Chromosphere**. 2013.  
 [Online].Available <http://sciexplorer.blogspot.com/2013/03/the-sun-part-6-photosphere-and.html>
- [26] Space Weather Prediction Center. **Sunspot Number Progression**. 2015.  
 [Online].Available :<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [27] Space weather Canada. **The history of the 10.7 cm Solar flux**. 2013.  
 [Online]. Availabel : <http://www.spaceweather.ca/solarflux/sx-2-eng.php>
- [28] Space Weather Prediction Center. **F10.7c.m. Radio Flux Progression**. 2015.  
 [Online].Available :<http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>
- [29] กรมอุตุนิยมวิทยา. **ความรู้อุตุนิยมวิทยา**.2557  
 [Online].Available<http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=23>
- [30] Lindzen, R.S. and Chapman, S. 1970. **Atmospheric tides : Thermal and gravitational**. Dordrecht : Reidel Publishing Company. pp. 33-36
- [31] Tanaporn blog. 2012. **เรื่องน่ารู้เกี่ยวกับภูมิศาสตร์**.  
 [Online].Available:<http://geography-earth.blogspot.com/2012/08/blog-post.html>

- [32] Biliza, D. 1990. "International Reference Ionosphere 1990." National Space Science Data Center, Report 90-22, Greenbelt, Maryland, USA,
- [33] Bilitza, D. et.al. 2014. "The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration." *Space Weather Space Clim.*
- [34] Rawer, K. Ramakrishnan, S. and Bilitza, D. 1975. "Preliminary reference profiles for electron and ion densities and temperatures proposed for the International Reference Ionosphere." Institut für physikalische Weltraumforschung: Freiburg, Germany Scientific Report W.B. 2
- [35] Rawer, K. Bilitza, D. and Ramakrishnan, S. 1978a. "International Reference Ionosphere 1978" International Union of Radio Science (URSI)
- [36] Rawer, K. Lincoln, V. and Conkright, R. Editors, 1981. "International Reference Ionosphere – IRI 79" World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Boulder, Colorado, USA, Report UAG-82
- [37] Bilitza, D. 1986. "International reference ionosphere : recent developments.", *Radio Sci.*, Vol.21, pp. 343-346
- [38] Bilitza, D. 1997. "International Reference Ionosphere – Status 1995/96.", *Adv. Space Res.*, Vol.20(9), pp. 1751-1754
- [39] Bilitza, D. 2001. "International Reference Ionosphere 2000.", *Radio Sci.*, Vol.36, pp. 261-275
- [40] Bilitza, D. and Reinisch, B.W. 2008. "International Reference Ionosphere 2007 : Improvements and new parameters.", *Adv. Space Res.*, Vol.42(2), pp. 599-609
- [41] Bibl, K. "Evolution of the ionosonde." *Annali Di Geofisica.*, Vol. 41, No. 5-6, pp. 667-680, November-December 1998
- [42] Picquenard, A. 1974. **Radio Wave Propagation.** London : The Macmillan Press Ltd.
- [43] Luxorion. 2000. **Software review.**
- [Online]. Available: <http://www.astrosurf.com/luxorion/qsl-soft-voacap3.htm>

- [44] ภูสิทธิ์สุวรรณแสง. 2552. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ณ ประเทศไทย. “  
 วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [45] Seishiro Ishii Interviewee, 9 February 2011. Poramintra Wongcharoen Interviewer.  
 The Ionosonde system. Chumphon Ionosphere Observation Station.
- [46] Piggott, W.R. and Rawer, K. 1978. “U.R.S.I. Hand Book of Ionogram Interpretation and Reduction.” Report UAG-23A, pp.65-135.
- [47] Wakai, N. Ohyama, H. and Koizumi, T. 1987. “Manual of Ionogram scaling.” Radio Research Laboratory Ministry of Posts and Telecommunication Japan. pp. 10-44.
- [48] Australian Government Bureau of Meteorology. 2015. Monthly Sunspot Number [Online]. Available: <http://www.ips.gov.au/Solar/1/6>
- [49] นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์. 2551. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟคเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ บริเวณละติจูดต่ำ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [50] Kenneth, K. 1990. ”Ionospheric radio.” London : Peter Peregrinus Ltd.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์หรือเผยแพร่

1. P. Wongcharoen, P. Kenpankho, K. Sepsirisuk, P. Supnithi, S. Nopanakeepong, S. Lerkvaranyu "Comparison of Critical Frequency of *E* layer Over Chumphon, Thailand with IRI 2007 Model" The 2013 International Electrical Engineering Congress (iEECON2013), pp.269-271, 2013
2. P. Wongcharoen, P. Kenpankho, K. Sepsirisuk, P. Supnithi, S. Nopanakeepong, S. Lerkvaranyu, T. Tsugawa, T. Nagatsuma "The Variation of Critical Frequency of ELayer Over Chumphon, Thailand" The 2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace2013), pp.198-201, 2013

# iEECON 2013

THE 2013 INTERNATIONAL ELECTRICAL ENGINEERING CONGRESS

Chiang Mai, Thailand

March 13-15, 2013

Organized By



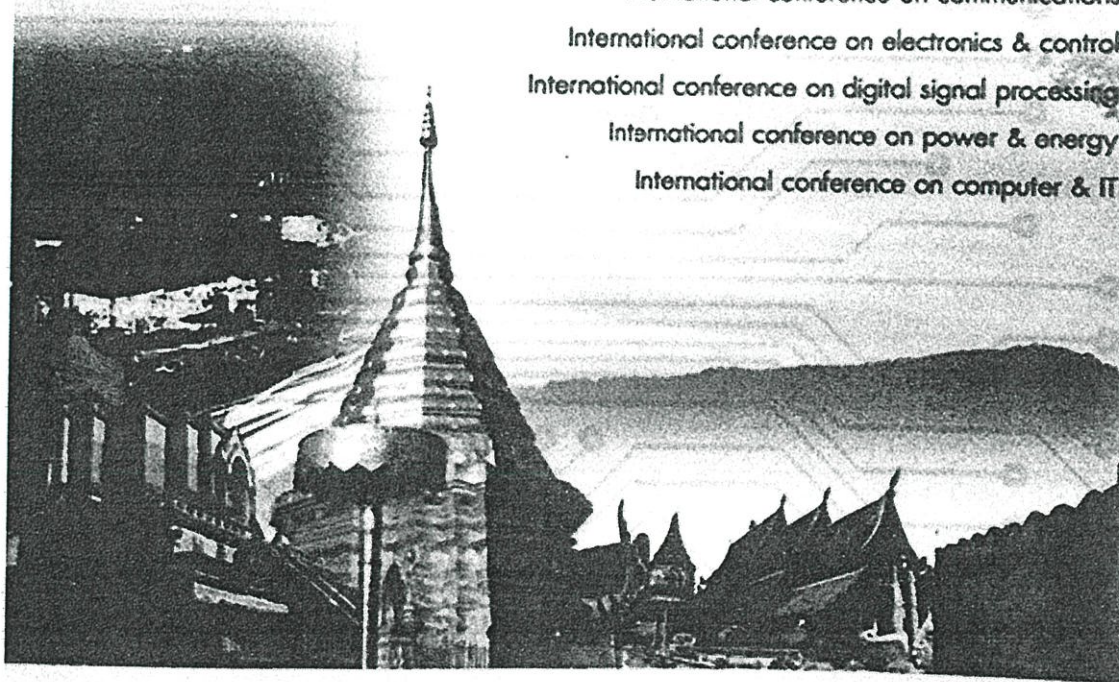
International conference on communications

International conference on electronics & control

International conference on digital signal processing

International conference on power & energy

International conference on computer & IT



Sponsored by



Technical sponsored by





2013 IEEE International Conference on Space Science & Communication

1-3 July 2013  
Hotel Equatorial Melaka  
Malaysia

# PROCEEDING

“Facing the Challenges of the Solar Maximum”

Organized by



Editors:  
Mardina Abdullah  
Norbahiah Misran  
Alina Marie Hasbi  
Mohd Fais Mansor  
Siti Aminah Bahari

In cooperation with



Supported by



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปรมินทร์ วงษ์เจริญ
วัน เดือนปีเกิด	12 พฤศจิกายน 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดหนองคาย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	พ.ศ. 2551
งานวิจัยที่สนใจ	ศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงชั้น E ของบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และ การเกิดซิลทิลเลชั่นภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2551-2552	ตำแหน่งเจ้าหน้าที่เทคโนโลยีสารสนเทศห้องสมุดประชาชนเทศบาลนครอุดรธานี
พ.ศ.2554	ตำแหน่งนักศึกษาช่วยสอนวิชา Telecommunications Engineering Laboratory 1, 2
พ.ศ.2555	ตำแหน่งนักศึกษาช่วยสอนวิชา Engineering Mathematics 1, 2, 3
พ.ศ.2556	ตำแหน่ง Rigger and Drive test Engineer บริษัท Metro Global Service