

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ณ ประเทศไทย

STUDY OF THE IONOSPHERIC SLAB THICKNESS VARIATION AT
THAILAND EQUATORIAL LATITUDE STATION

ปฐิติ สุวรรณแสง
PUSIT SUWANNASANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KIITL-2009-EN-M-010-079

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์
บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ณ ประเทศไทย

STUDY OF THE IONOSPHERIC SLAB THICKNESS VARIATION AT
THAILAND EQUATORIAL LATITUDE STATION



T105118

ภูสิทธิ์ สุวรรณแสง

PUSIT SUVANNASANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....1051181
วันเดือนปี.....16 พ.ย. 2552

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-010-079

**STUDY OF THE IONOSPHERIC SLAB THICKNESS VARIATION AT
THAILAND EQUATORIAL LATITUDE STATION**

PUSIT SUVANNASANG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-010-079

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์
สูตรแม่เหล็ก ณ ประเทศไทย

Thesis Title Study of The Ionospheric Slab Thickness Variation at Thailand Equatorial Latitude
Station

นักศึกษา นายภูสิทธิ์ สุวรรณแสง

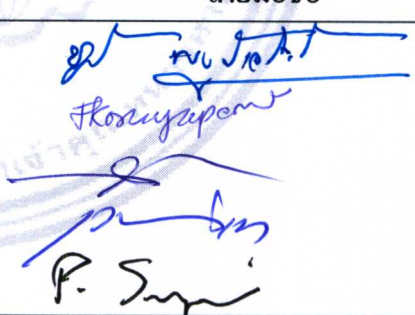
รหัสประจำตัว 47061019

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นिति

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-010-079

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชูวงศ์	พงศ์เจริญพาณิชย์	
ผศ.ดร.จิรสุดา	โกษิยาภรณ์	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาถิพงษ์	
รศ.เวช	วิเวก	
ผศ.ดร.พรชัย	ทรัพย์นिति	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ณ ประเทศไทย
นักศึกษา	นายภูสิทธิ์ สุวรรณแสง
รหัสนักศึกษา	47061019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษา และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้แก่ ความถี่วิกฤตของชั้นเอฟสอง (f_oF_2) ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง (N_mF_2) ปริมาณอิเล็กตรอนรวม (TEC) และ กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (τ) โดยอุปกรณ์วัด f_oF_2 และ TEC ตั้งอยู่ ณ สถานีเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก และเส้นรุ้งแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ ซึ่งความถี่วิกฤตของชั้นเอฟสองได้จากการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรมโดยใช้เทคนิคไอโอโนซอนเด ปริมาณอิเล็กตรอนรวมได้จากการวัดค่าประวิงเวลาของสัญญาณดาวเทียม GPS ย่าน L แบนด์ 2 ความถี่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองได้จากการคำนวณหาความสัมพันธ์กับ f_oF_2 และ กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จากการคำนวณอัตราส่วนของ TEC กับ N_mF_2 โดยทำการเก็บวัดข้อมูลตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 ซึ่งเป็นช่วงที่ปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาระหว่างวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และ วัฏจักรสุริยะของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ค่า ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล ของ f_oF_2 , N_mF_2 และ TEC จะมีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันคือ ในช่วงเวลา 17.00 – 19.00 น. จะมีค่าสูงสุดในฤดูกาล Equinox และ จะมีค่าต่ำสุดในฤดูกาล Summer จากการสังเกต τ ในฤดูกาล Equinox ของปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าต่ำสุดและต่ำกว่าฤดูกาล Summer และ Winter การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ τ มีความผิดปกติสูงอยู่ 2 ช่วงเวลา คือช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น และหลังพระอาทิตย์ตก และ τ จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric storms) ซึ่งต้องอาศัยความสัมพันธ์ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic storms) โดยค่าดัชนี Dst มีค่า ≤ -100 nT เป็นตัวอ้างอิง และใช้

ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของความถี่วิกฤตของชั้นเอฟสอง และค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม จากค่ามัธยฐานของเดือนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ จากผลการวิจัยพบว่าในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกรุนแรง ซึ่งมีค่า Dst ต่ำกว่า -100 nT เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของปริมาณอิเล็กตรอนรวมและความถี่วิกฤตจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกและลบสูงกว่า 30% จากค่ามัธยฐานของเดือนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก

Thesis Title	Study of The Ionospheric Slab Thickness Variation at Thailand Equatorial Latitude Station
Student	Mr. Pusit Suvannasang
Student ID.	47061019
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pornchai Supnithi

ABSTRACT

This thesis proposes to study and analyse the parameters of ionosphere characteristics such as the F2 peak critical frequency (f_oF_2), the peak electron density in the F2 region (NmF_2), the total electron content (TEC) and the ionospheric slab thickness (τ). The f_oF_2 and TEC are analyzed at the Chumphon campus of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, on geographic latitude $10.7^\circ N$, longitude $99.3^\circ E$ or equivalently, magnetic latitude $3.22^\circ N$. The f_oF_2 is determined by the ionosonde technique. The total electron content is determined by the correlation of difference time delay of 2 L – band signals from the GPS satellites. The NmF_2 is computed from f_oF_2 and the ionospheric slab thickness is defined as a ratio of TEC to NmF_2 . The measured data from January 2004 to December 2006 for low solar activity are analyzed based on the diurnal, monthly, seasonal period, and solar activity. For seasonal variation of f_oF_2 , NmF_2 and TEC, similar changes occur during 5.00-7.00 p.m. with the peaks during equinox and the minimum during summer. It can be seen that τ in equinox of 2004-2006 are the lowest and lower in summer than in winter. The diurnal variation show two abnormal peaks that appear during the pre-sunrise and post-sunset hours. The peak values decrease as the sunspot number increases, particularly, the pre-sunrise peak. Furthermore, the study of the day with the ionospheric storms is accompanied by the intense geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT). The occurrence and the variation of ionospheric storms are expressed as the percentage deviations of f_oF_2 and TEC from the monthly median. According to the study, the day which geomagnetic storms ($Dst \leq -100$ nT), it can be concluded that the deviations of f_oF_2 and TEC showed more than about 30% from monthly median.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ผศ.ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ณรงค์ เหมภรณ์ และ รศ. นิภา ลีถาวรจิ อาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการสื่อสารดาวเทียม และ ผศ. ประเสริฐ เคนพันคือ ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสี่ท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

I would like to express my deeply many thanks to Prof. Masabumi Kawamura and Prof. Maho Nakamura from Ionosphere and Radio Propagation Group National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1, Nukui-kita, Tokyo 184-8795 Japan, for the advice and support concerning my paper and thesis.

ขอกราบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณองค์กร NICT และสำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่านในห้องปฏิบัติการสื่อสารดาวเทียม และในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกท่านจากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ภูสิทธิ์ สุวรรณแสง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	6
2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศโลก.....	6
2.1.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง.....	7
2.1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	9
2.1.2.1 ชั้น D.....	13
2.1.2.2 ชั้น E.....	13
2.1.2.3 ชั้น F.....	14
2.2 จุดดับบนดวงอาทิตย์และวัฏจักรสุริยะ.....	15
2.3 ทฤษฎีการส่งคลื่นสั้นในการสื่อสารระยะไกล.....	18
2.4 เทคนิคไอโอโนซอนด์.....	23
2.5 แนวคิดและหลักการคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์.....	24
2.6 แนวคิดและหลักการคำนวณค่ากลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการศึกษาวิจัย.....	29
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.1.1 อุปกรณ์วัดความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	29
3.1.1.1 สายอากาศ.....	30
3.1.1.2 ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ.....	32
3.1.1.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม.....	32
3.1.2 อุปกรณ์วัดปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	32
3.1.2.1 สายอากาศ.....	33
3.1.2.2 เครื่องรับสัญญาณ GPS.....	34
3.1.2.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล TEC.....	34
3.2 วิธีการเก็บผลและวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
3.2.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ foF2 จาก ไอโอโนแกรม.....	35
3.2.2 ขั้นตอนการเก็บผล TEC.....	43
บทที่ 4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ปริมาณอิเล็กตรอนรวม ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 และกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	44
4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	44
4.1.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน.....	45
4.1.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน.....	47
4.1.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล.....	49
4.1.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2.....	52
4.2.1	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ของชั้น F2 แบบรายวัน.....	52
4.2.2	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ของชั้น F2 แบบรายเดือน.....	54
4.2.3	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ของชั้น F2 ตามฤดูกาล.....	57
4.2.4	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ของชั้น F2 แบบรายปี.....	59
4.3	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์.....	60
4.3.1	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน.....	60
4.3.2	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน.....	62
4.3.3	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล.....	65
4.3.4	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี.....	67
4.4	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์.....	68
4.4.1	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน.....	68
4.4.2	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน.....	70
4.4.3	ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล.....	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี.....	75
4.4.5 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของค่า TEC NmF2 และ τ ตามฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2549.....	77
บทที่ 5 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ความถี่ วิกฤตของชั้น F2 และปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	79
5.1 หลักการเกี่ยวกับการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์.....	79
5.1.1 พายุไอโอโนสเฟียร์แบบลบ.....	80
5.1.2 พายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวก.....	80
5.1.3 ผลกระทบที่สำคัญของพายุไอโอโนสเฟียร์.....	81
5.2 ค่าดัชนี Dst (Dst index).....	81
5.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก.....	82
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 รายละเอียดของเครื่องมือในการวัดความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
4.1 ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549.....	51
4.2 ค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลากลางวัน (08.00–16.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20.00–04.00 น.) สำหรับทั้ง 3 ฤดูกาล และแบบรายปีในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549.....	76
4.3 ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของค่าเฉลี่ยทั้ง 3 พารามิเตอร์ตามฤดูกาล ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549.....	77
5.1 ค่าดัชนี Dst ที่แบ่งระดับความรุนแรงของการเกิดพายุแม่เหล็กโลก.....	82

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การแบ่งประเภทของชั้นบรรยากาศโลก.....	6
2.2 ขบวนการไอออโนสเฟียร์.....	9
2.3 ขบวนการรวมตัวกันใหม่.....	10
2.4 เส้นรุ้งแม่เหล็กบนแผนที่ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์.....	12
2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	12
2.6 จุดดับบนดวงอาทิตย์ที่ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	15
2.7 คู่ของจุดดับจะเรียงกันในแนวอนเกือบขนานกับเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์.....	17
2.8 วัฏจักรสุริยะตั้งแต่ ค.ศ. 1996 ถึง ค.ศ. 2020.....	18
2.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 กับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์.....	20
2.10 ความสัมพันธ์ของ สคิปโซน (skip zone) ระยะทางของการสื่อสารโดยใช้คลื่นฟ้า และระยะทางของคลื่นดิน.....	22
2.11 ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้เทคนิคไอโอโน ซอนด์.....	23
2.12 เรขาคณิตของดาวเทียมจีพีเอส เครื่องรับ (R) และ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	26
2.13 แบบจำลองจุดดับบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี ค.ศ. 1998 ถึง 2010.....	27
2.14 ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii (19° N, 26° E) ในช่วงเวลาที่ ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด (ค.ศ. 1981) และ ต่ำสุด (ค.ศ. 1985) ตามลำดับ.....	28
3.1 สายอากาศโฟลเต็คไดโพล.....	31
3.2 เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar.....	31
3.3 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การวัด TEC	33
3.4 สายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS (Novatel's Model 502GPSAntenna).....	33
3.5 ภาพเครื่องรับสัญญาณ GPS.....	34
3.6 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลค่า TEC.....	35
3.7 การวัดค่า foF2 จากภาพไอโอโนแกรม โดยโปรแกรม Special scaling.....	36
3.8 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm).....	37
3.9 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดการลดทอน และการแทรกสอด.....	39
3.10 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อคลื่นมีการสะท้อนที่ผิดไปจากปกติ.....	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน ในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549.....	45
4.2 ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549.....	47
4.3 ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549.....	49
4.4 การเปรียบเทียบความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549.....	51
4.5 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 แบบรายวันใน ระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549.....	52
4.6 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549.....	55
4.7 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549.....	57
4.8 การเปรียบเทียบความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549.....	59
4.9 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน ในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549.....	61
4.10 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549.....	63
4.11 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549.....	65
4.12 การเปรียบเทียบปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบรายปีในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549.....	67
4.13 กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันใน ระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549.....	69
4.14 กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549.....	71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549.....	73
4.16 การเปรียบเทียบกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549.....	75
5.1 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2547 (ก) วันที่ 22-24 มกราคม (ข) วันที่ 11-13 กุมภาพันธ์ (ค) วันที่ 25-27 กรกฎาคม (ง) วันที่ 8-10 พฤศจิกายน.....	83
5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2548 (ก) วันที่ 22-24 มกราคม (ข) วันที่ 8-10 พฤษภาคม (ค) วันที่ 15-17 พฤษภาคม (ง) วันที่ 24-26 สิงหาคม.....	87
5.3 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ในปี พ.ศ. 2549 (ก) วันที่ 14-16 เมษายน (ข) วันที่ 15-17 ธันวาคม.....	89

ทำนายปรากฏการณ์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยมีแบบจำลองหลายรูปแบบ [49]-[53] มี การพัฒนาการทำนายพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาสภาวะปกติ แบบจำลองที่ได้จากการทดลองถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในสภาวะปกติของแม่เหล็กโลก คือ แบบจำลอง IRI (IRI model) [54]- [56] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลค่ามัธยฐานของ ความหนาแน่นอิเล็กตรอน อุณหภูมิอิเล็กตรอน และ การ ประกอบขึ้นของไอออน เนื่องจากฟังก์ชันของความสูงสำหรับที่ค้าง เวลา และ ปริมาณจุดดับบนดวง อาทิตย์ เวอร์ชันล่าสุดของ IRI ประกอบด้วยช่วงเวลาในการเกิดพายุ (Storm-time) ที่ได้จากการ ทดลองและแก้ไขในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (STORM model) [57]-[58]

ช่วงเวลาในการเกิดพายุขึ้นอยู่กับความรุนแรงของพายุ และฟังก์ชันของละติจูด และฤดูกาล [59]-[60] นอกจากนี้มีการศึกษาประสิทธิภาพของ IRI-2000 กับการแก้ไขของแบบจำลองพายุ รวมถึงการประมาณค่าในชั้นที่เกิดความผิดปกติบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิด พายุแม่เหล็กโลกรุนแรง ($Dst < -100$ nT) โดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลไอโอโนซอนด์ร่วมกับ ข้อมูลการทำนายที่ได้จากแบบจำลอง IRI [38] ยิ่งกว่านั้นการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ยังสามารถใช้ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม ร่วมกับการเกิดพายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic storms) โดยทำการ เปรียบเทียบปริมาณอิเล็กตรอนรวมในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกกับค่ามัธยฐานของวันที่เหตุการณ์ เป็นปกติ [37]

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการเกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งต้องอาศัย ความสัมพันธ์ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก โดยค่าดัชนี Dst มีค่า ≤ -100 nT เป็นตัวอ้างอิง และใช้ เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของความถี่วิกฤตของชั้นเอฟสอง และเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนปริมาณ อิเล็กตรอนรวม จากค่ามัธยฐานของเดือนที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิด และการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์และการเปลี่ยนแปลง ความถี่วิกฤต ของชั้น F2 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ความหนาแน่นอิเล็กตรอน สูงสุดของชั้น F2 และ กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในช่วง เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 ในบริเวณ ละติจูดต่ำ ณ ประเทศไทย โดยจะทำการศึกษา และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทั้ง 4 พารามิเตอร์ที่ได้กล่าวมานั้นมีความสอดคล้องเกี่ยวเนื่องกัน อย่างไร โดยได้ทำการวิเคราะห์ในลักษณะรูปแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และ รายปี อีกทั้งยัง ศึกษาว่า ช่วงเวลา และ ฤดูกาลต่างๆ รวมถึงจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ มีความสัมพันธ์กับ พารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวอย่างใดตามช่วงเวลาและฤดูกาลต่างๆ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์

ในวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ อ้างอิงจากวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก [31] โดยใช้เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนความถี่วิกฤตของชั้น F2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนปริมาณอิเล็กตรอนรวม เป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งผลจากการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและแก้ไขระบบและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [1]-[7] จะสังเกตได้ว่า τ ในแต่ละพื้นที่จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ ตำแหน่งที่ตั้ง เส้นรุ้ง เส้นแวง และปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยดังกล่าวพบว่า τ จะแปรผกผันกับปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา τ ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก ในแถบละติจูดต่ำ (Low latitude) ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำดังนั้นจึงคาดการณ์ว่า τ ในช่วงปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูง นอกจากนี้ในการศึกษาของนักวิจัยที่ผ่านมาในเรื่องพายุไอโอโนสเฟียร์จะอาศัยเหตุการณ์วันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ในการศึกษาและวิจัย [34]-[38] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของพายุจะขึ้นอยู่กับ ระยะเวลาของการเกิดพายุ ตำแหน่งที่ตั้ง (ความสูง , เส้นรุ้ง , เส้นแวง) และ เวลาท้องถิ่น (local time) ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวจะใช้ พารามิเตอร์ foF2 , NmF2 และ TEC ค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้ง 3 ค่า ในการศึกษาถึงการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของพายุไอโอโนสเฟียร์ร่วมกับวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในการศึกษาถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงพายุไอโอโนสเฟียร์

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์การวัดข้อมูล 2 ชุด โดยวัด ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ซึ่งใช้เทคนิค ไอโอโนซอนด์บันทึกค่าเป็นไอโอโนแกรม และ วัดค่า TEC จากอุปกรณ์การวัด TEC จากนั้นนำค่า foF2 มาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ NmF2 ได้ดังสมการต่อไปนี้ [2]

$$NmF2 = 1.24 (foF2)^2 \times 10^{10} \text{ el/m}^3 \quad (1.1)$$

เมื่อ NmF2 คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 มีหน่วยเป็น (el/m^3) และค่า foF2 คือ ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีหน่วยเป็น (MHz)

หลังจากนั้นเมื่อทำการหาค่า NmF2 ได้แล้วก็จะทำการหาค่ากลุ่มความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จากค่าอัตราส่วนของ ค่า TEC กับ ค่า NmF2 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [2]

$$\tau = TEC / NmF2 \quad \text{km} \quad (1.2)$$

เมื่อ τ คือค่ากลุ่มความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีหน่วยเป็น (km) และ TEC คือค่า ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีหน่วยเป็น (el/m^2)

จากนั้นนำข้อมูลทั้ง 4 พารามิเตอร์มาศึกษาถึงพฤติกรรมและการเปลี่ยนแปลง และ วิเคราะห์ ข้อมูลว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ในวันที่เกิดเหตุการณ์ พายุไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 และค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้น บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์ พายุไอโอโนสเฟียร์

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ คุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ตัว คือ foF2, NmF2, TEC และ τ ซึ่งอุปกรณ์วัด foF2 และ TEC ตั้งอยู่ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย โดยทำการเก็บวัดข้อมูลตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี นอกจากนี้ยังได้ศึกษาในเรื่องพายุไอโอโนสเฟียร์ อ้างอิงจากวันที่เกิดพายุแม่เหล็ก

โลก [31] โดยใช้ข้อมูลในช่วงเดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 เพื่อหาความสัมพันธ์ในวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนความถี่วิกฤตของชั้น F2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนปริมาณอิเล็กตรอนรวม เป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จุดดับบนดวงอาทิตย์ และวัฏจักรสุริยะ ทฤษฎีการส่งคลื่นสั้นในการสื่อสารระยะไกล เทคนิคไอโอโนซอนด์ แนวคิดและหลักการคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนรวม และ หลักการหาค่ากลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

บทที่ 3 กล่าวถึงอุปกรณ์การวัดความถี่วิกฤตของชั้น F2 อุปกรณ์วัดปริมาณอิเล็กตรอนรวม และ วิธีการเก็บผลและการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 4 กล่าวถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ปริมาณอิเล็กตรอนรวม ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 และ กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในรูปแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และ รายปี การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุด ต่อค่าต่ำสุด ของค่าเฉลี่ยทั้ง 3 พารามิเตอร์ คือ TEC , NmF2 และ τ ตามฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549

บทที่ 5 กล่าวถึงหลักการเกี่ยวกับการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ ค่าดัชนี Dst (Dst index) และ ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

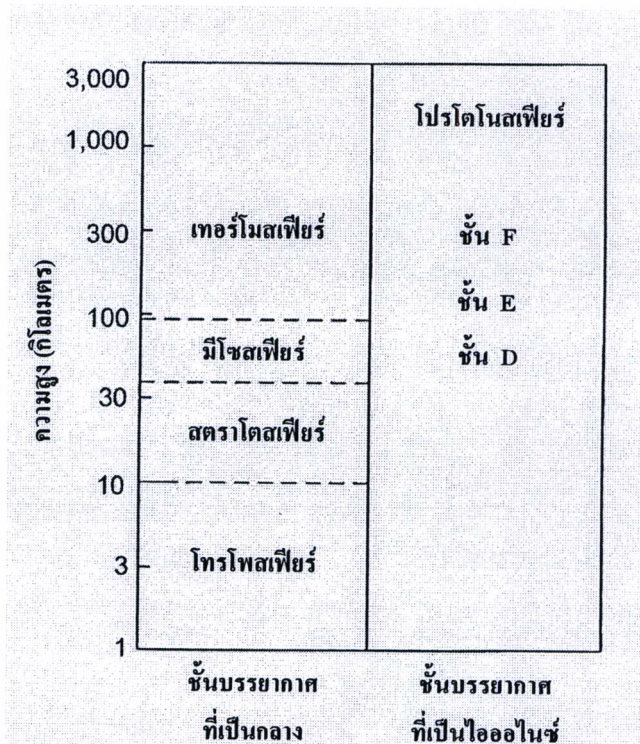
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วยลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศโลก จุดดับบนดวงอาทิตย์และวัฏจักรสุริยะ ทฤษฎีการส่งคลื่นสั้นในการสื่อสารระยะไกล เทคนิคไอโอโนซอนด์ แนวคิดและหลักการคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนรวม และหลักการหาค่ากลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้มีความจำเป็นต่อการศึกษา และวิเคราะห์คุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศโลก

ชั้นบรรยากาศของโลกถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเบื้องต้น คือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง (Neutral atmosphere) และชั้นบรรยากาศที่เป็นไอออไนซ์หรือเรียกว่าไอโอโนสเฟียร์ (Ionized atmosphere) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแบ่งประเภทของชั้นบรรยากาศโลก [8]

โดยโครงสร้างของชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางสามารถจัดกลุ่มได้โดยใช้โทรโพลีอุณหภูมि ในขณะที่ชั้นบรรยากาศที่เป็นไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งลักษณะได้โดยใช้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน

2.1.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง

ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางสามารถแบ่งได้โดยใช้โทรโพลีอุณหภูมิ โดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้นใหญ่ๆ ประกอบด้วยชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่เราใช้ดำรงชีวิตอยู่ โดยมีระยะความสูงเมื่อเทียบกับพื้นดินประมาณ 1-10 กิโลเมตร โดยในชั้นบรรยากาศนี้จะประกอบไปด้วยก๊าซชนิดต่างๆ รวมไปถึงฝุ่นละออง และมลภาวะที่มาจากแหล่งต่างๆ ตลอดจน เมฆฝน ไอน้ำหมอก และหิมะ โดยในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์นี้ อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศในระยะแรกจะลดลงผกผันกับความสูงที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา $7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ [9]

ชั้นสตราโตสเฟียร์ อยู่ถัดจากชั้นโทรโปสเฟียร์ขึ้นไป ที่ขอบล่างของชั้นนี้ประกอบด้วยชั้นที่มีอุณหภูมิกิ่งที่ ซึ่งมีความหนาหลายกิโลเมตร เรียกว่าชั้นไอโซเทอร์มัล (Isothermal layer) ประมาณระดับ 20 กิโลเมตรขึ้นไป อุณหภูมิจะสูงขึ้นตามความสูง บริเวณขอบบนของสตราโตสเฟียร์ ซึ่งอยู่สูงจากผิวโลกประมาณ 55 กิโลเมตร เรียกว่า สตราโตพอส (Stratopause) จะมีอุณหภูมิกิ่งเดียวกับอุณหภูมิตที่ผิวโลก บรรยากาศชั้นนี้ไม่แปรปรวน เนื่องจากอากาศระดับบนมีอุณหภูมิกิ่งสูงกว่าระดับล่าง จึงไม่เกิดการยกตัวของอากาศ และชั้นนี้แทบจะไม่มีไอน้ำอยู่เลย จึงปราศจากเมฆหรือฝนแต่ในบางโอกาสอาจพบเมฆสีมุก (Mother-of-pearl clouds หรือ Nacreous clouds) ที่ระดับ 20-30 กิโลเมตร ในละติจูดกลางและละติจูดสูง และเนื่องจากอากาศในชั้นนี้มีเสถียรภาพมากและทัศนวิสัยดีเครื่องบินจึงสามารถบินผ่านโดยไม่ต้องผจญกับพายุอากาศ อย่างไรก็ตามตอนล่างของชั้นนี้โดยเฉพาะเขตขั้วโลกในช่วงฤดูหนาวมักพบว่ามีการไหลของอากาศในแนวระดับเกิดขึ้น เรียกว่า กระแสลมกรด (Jet stream) ซึ่งมีความเร็วลมมากกว่า 80 เมตรต่อวินาที รังสีดวงอาทิตย์ทำให้โมเลกุลของออกซิเจนแตกตัว และเกิดเป็นโมเลกุลของไอโซน ซึ่งมีคุณสมบัติดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ กระบวนการนี้เกิดขึ้นทางตอนบนของสตราโตสเฟียร์ [10]

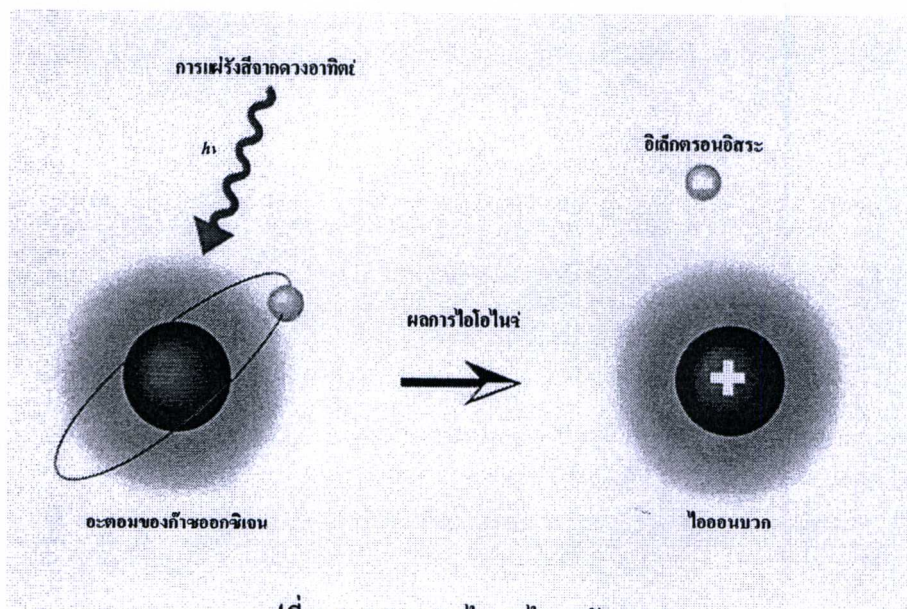
ชั้นมีโซสเฟียร์ เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากสตราโตสเฟียร์ขึ้นไป มีระดับความสูงที่ประมาณ 55-80 กิโลเมตร เนื่องจากแหล่งความร้อนของชั้นนี้อยู่บริเวณตอนบนของสตราโตสเฟียร์ บรรยากาศชั้นนี้จึงมีอุณหภูมิลดลงตามความสูง บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดของบรรยากาศอยู่บริเวณขอบบนของมีโซสเฟียร์ เรียกว่ามีโซสพอส (Mesopause) ในฤดูร้อน อุณหภูมิบริเวณมีโซสพอสเหนือเขตร้อนอาจมีอุณหภูมิต่ำถึง -100 องศาเซลเซียส โดยที่ชั้นนี้มีแหล่งความร้อนอยู่ทางตอนล่าง จึงมีการยกตัวของอากาศในแนวตั้ง และการที่ชั้นนี้มีไอน้ำอยู่น้อยไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นผลึกน้ำแข็งบนอนุภาคฝุ่นทำให้เกิดการก่อตัวของเมฆ น้ำแข็ง ซึ่งมีสีเทาเงิน และสีฟ้า มีลักษณะเหมือนเมฆขนนก มักปรากฏในละติจูดสูงในช่วงใกล้ดวงอาทิตย์ตก เรียกเมฆชนิดนี้ว่า เมฆสี หรือ เมฆพรายน้ำ

(Noctilucent clouds) ในขณะที่ดวงอาทิตย์ทำมุม 5-13 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าแนวระดับ การที่อากาศในชั้นนี้มีการเคลื่อนที่ทั้งในแนวตั้งและในแนวราบ ทำให้อากาศมีการผสมผสานกันอย่างทั่วถึง บรรยากาศจึงประกอบด้วยก๊าซชนิดต่าง ๆ ในอัตราส่วนคงที่ เรียกชั้นบรรยากาศที่อยู่ถัดจากผิวโลกถึงมีโซพอส ว่าโฮโมสเฟียร์ (Homosphere หรือ Homogeneous atmosphere) [10]

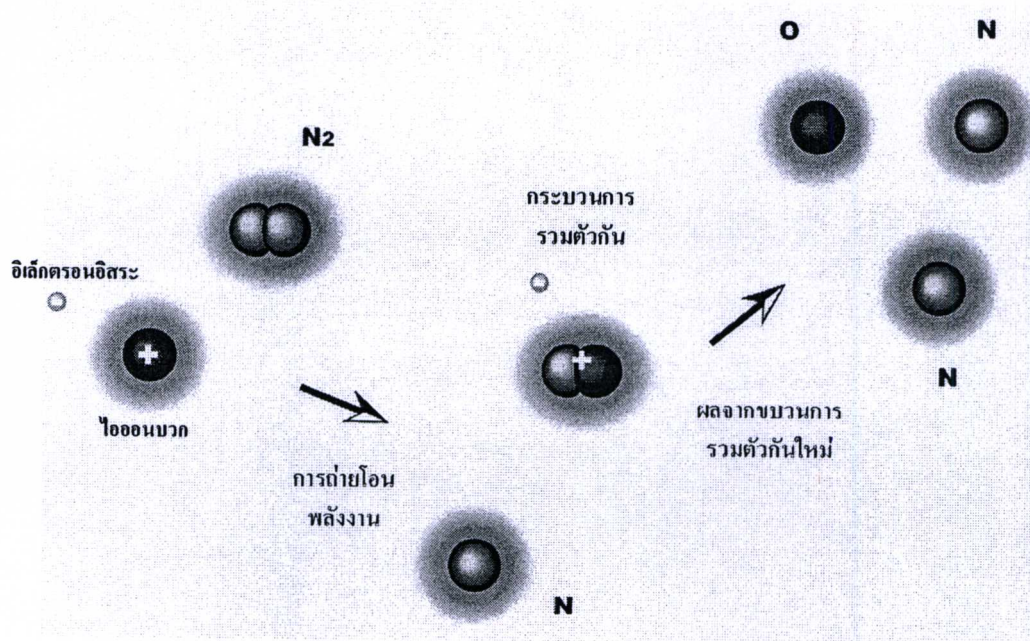
ชั้นเทอร์โมสเฟียร์ อยู่ถัดจากมีโซพอสขึ้นไปจนถึงความสูงประมาณ 800 กิโลเมตรจากผิวโลก ความสูงของชั้นนี้ขึ้นกับความรุนแรงของปฏิกิริยาบนดวงอาทิตย์ ในช่วงที่ปฏิกิริยาบนดวงอาทิตย์มีความรุนแรงมาก ชั้นนี้จะมีความสูงมากตามไปด้วย อุณหภูมิของบรรยากาศชั้นนี้จะสูงขึ้นตามความสูงที่ระดับความสูง 200 กิโลเมตร จะมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 700 องศาเซลเซียสและที่ระดับ 300 กิโลเมตร มีอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาทางเคมีของแสงทำให้ก๊าซต่าง ๆ ในชั้นนี้แตกตัวเป็นไอออนจึงอาจเรียกว่า ไอโอโนสเฟียร์ การชนกันระหว่างส่วนของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ กับโมเลกุลและอะตอมของก๊าซในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กโลกทำให้เกิดการเปล่งแสง ซึ่งจะเห็นเป็นม่านแสงพุ่งขึ้นจากขอบฟ้าในเวลากลางคืน มักพบบริเวณตอนล่างของชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่ความสูงระหว่าง 90 ถึง 130 กิโลเมตร ถ้าม่านแสงพุ่งขึ้นทางทิศเหนือเรียกว่า แสงเหนือ (Aurora borealis) แต่ถ้าพุ่งขึ้นทางทิศใต้ เรียกว่าแสงใต้ (Aurora australis) และจะมีบางครั้งซึ่งอาจตรวจพบแสงชนิดนี้ที่ระดับ 1,000 กิโลเมตร ชั้นบรรยากาศที่อยู่ถัดจากชั้นมีโซสเฟียร์ขึ้นไป ปฏิกิริยาทางเคมีของแสงเนื่องจากรังสีดวงอาทิตย์ และการที่อยู่ห่างไกลจากแรงดึงดูดของโลก อัตราส่วนของก๊าซต่าง ๆ จะผันแปรไปตามความสูง ชั้นที่อยู่สูงกว่าจะประกอบด้วยก๊าซที่มีน้ำหนักเบากว่าและไม่ค่อยมีการผสมผสานกับก๊าซที่หนักกว่า จึงเรียกชั้นบรรยากาศที่อยู่ถัดจากชั้นมีโซสเฟียร์ขึ้นไปว่า เฮเทอโรสเฟียร์ (Heterosphere) ซึ่งในระดับที่ต่ำกว่า 240 กิโลเมตร จะประกอบด้วยโมเลกุลของไนโตรเจนเป็นส่วนใหญ่และโมเลกุลของออกซิเจนเป็นบางส่วน ที่ระดับสูงขึ้นไปแต่ต่ำกว่า 1,000 กิโลเมตรประกอบด้วยออกซิเจนอะตอมเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ และระหว่าง 1,000 - 2,400 กิโลเมตร ประกอบด้วยฮีเลียมอะตอมเดี่ยว ส่วนเหนือระดับ 2,400 กิโลเมตรขึ้นไป บรรยากาศจะประกอบด้วยไฮโดรเจนอะตอมเดี่ยว ซึ่งจะกลมกลืนไปกับก๊าซระหว่างดาว [10]

2.1.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยกลุ่มพลาสมา (Plasma) ที่เกิดการไอออไนซ์รวมตัวกันจนมีความหนาแน่นพอที่จะสะท้อนคลื่นวิทยุในความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน HF มีขอบเขตประมาณ 50 - 2,000 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นอยู่ที่ 10^{10} - 10^{12} อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร [11] โดยมีโมเลกุลเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ถูกไอออไนซ์ และพบว่ายังคงมีโมเลกุลที่เป็นกลางจำนวนมากเหลืออยู่ในชั้นที่อยู่สูงกว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ ชั้นพลาสมาสเฟียร์ (Plasmasphere) หรือโปรโตโนสเฟียร์ (Protonosphere) ซึ่งยังคงมีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระอยู่อย่างชัดเจน ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ คือ สนามแม่เหล็กของโลกที่ทำหน้าที่ต่อต้านลมสุริยะ (Solar wind) นั่นเอง ส่วนขบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) เกิดจากการที่อะตอมของก๊าซออกซิเจน (Atomic oxygen) ทำปฏิกิริยากับแสงอาทิตย์ (Solar EUV Flux) แล้วเกิดการแยกตัวระหว่างไอออนบวก (Positive ion) กับอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ซึ่งเราเรียกปฏิกิริยานี้ว่าการไอออไนซ์จากแสงอาทิตย์ (Photo ionization) โดยการไอออไนซ์นี้จะเกิดไม่เท่ากันแล้วแต่ช่วงเวลา และระดับความสูง อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสภาวะที่อำนวยความสะดวกการเกิดขบวนการไอออไนซ์ เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ปริมาณการชนกันของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีคอสมิก (Cosmic) โดยเมื่อรังสีแผ่เข้าถึงชั้นบรรยากาศจะทำให้จำนวนอนุภาคบางส่วนของอากาศนั้นกลายเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ รูปที่ 2.2 แสดงขบวนการไอออไนซ์เซชัน



รูปที่ 2.2 ขบวนการไอออไนเซชัน [12]



รูปที่ 2.3 ขบวนการรวมตัวกันใหม่ [12]

จากรูปที่ 2.2 สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของออกซิเจนอะตอม (O) ที่เป็นส่วนประกอบหลักจะถูกไอออไนซ์โดยโฟตอน ($h\nu$) จากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ สามารถแสดงได้ดังสมการ



โดยผลผลิตที่ได้คือ ฮีเลียมไอออน และโมเลกุลซึ่งสูญเสียฮีเลียมไอออนหนึ่งตัวหลุดออกไปทำให้กลายเป็นไอออนประจุบวก (โมเลกุลที่ได้รับฮีเลียมไอออนไปก็จะกลายเป็นไอออนประจุบวก) ไอออนเหล่านี้เปลี่ยนแปลงได้ง่ายภายใต้แรงทางไฟฟ้า เช่น แรงดูด หรือแรงผลัก โดยปกติแล้วฮีเลียมไอออน และอะตอมต่างๆ ของก๊าซจะเคลื่อนที่ไปมาตลอดจึงมีการชนเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีขบวนการการรวมตัวกันใหม่ (Process of recombination) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.3

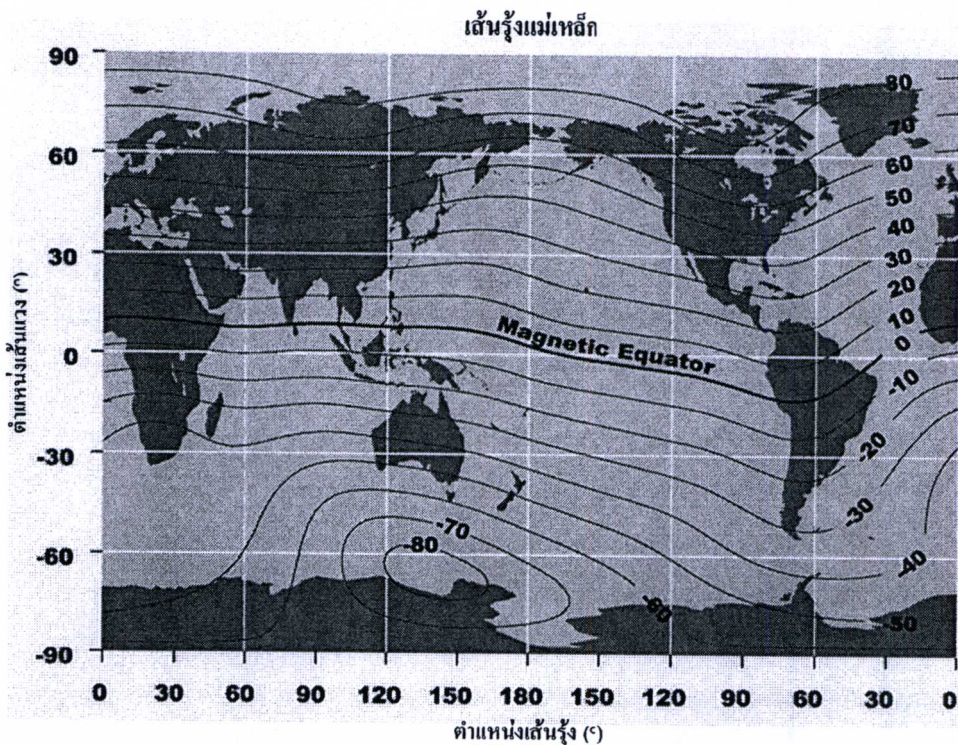
จากรูปที่ 2.3 อธิบายได้ว่าไอออนที่เกิดจากขบวนการไอออไนซ์ชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง (N_2) จะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนพลังงาน หรือการแลกเปลี่ยนประจุและจะรวมตัวใหม่กับฮีเลียมไอออน แยกตัวได้เป็นโมเลกุลที่เป็นกลาง ดังนี้



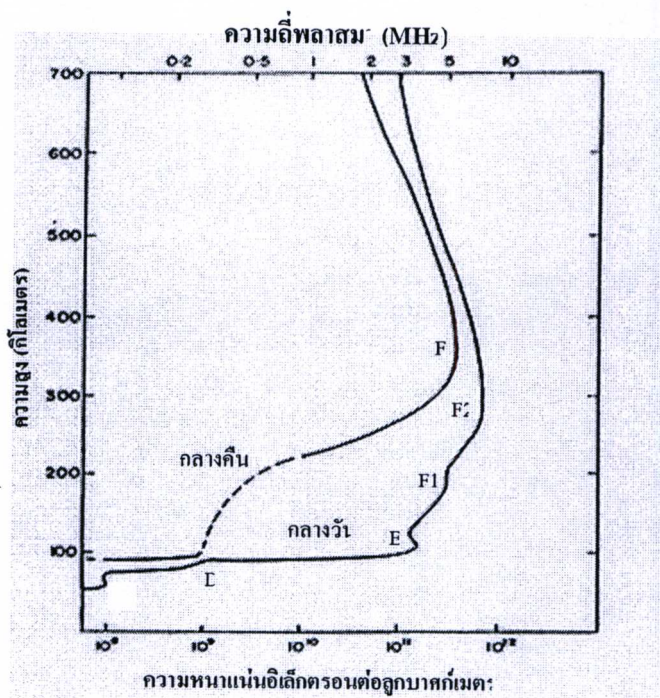


ดังนั้นโมเลกุลหนึ่งโมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์ จะไม่คงความเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ตลอดไป โดยในส่วนของชั้นบรรยากาศโลกที่ต่ำ (ความกดดันสูง) จะมีการชนกันของอนุภาคที่มาก จึงมีโอกาสเกิดขบวนการรวมตัวกันใหม่มาก ดังนั้นโมเลกุลของอากาศจะคงความเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ในระยะเวลาสั้นกว่าชั้นบรรยากาศส่วนบน นอกจากนี้แล้วรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ได้ถูกดูดซับไปเป็นจำนวนมากแล้วโดยชั้นบรรยากาศส่วนบน ดังนั้นในบริเวณที่ความสูงต่ำกว่า 50 กิโลเมตร จะมีการไอออไนซ์เกิดขึ้นน้อยมาก ในทางกลับกันที่ความสูงมากกว่า 400 กิโลเมตรนั้นมีอนุภาคของอากาศที่เบาบาง ทำให้ความหนาแน่นของการไอออไนซ์มีค่าต่ำมาก ถึงแม้ว่าจะได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์มากก็ตาม อาจกล่าวได้ว่าชั้นบรรยากาศในระดับความสูงในช่วง 50-400 กิโลเมตรซึ่งก็คือระดับการวางตัวของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นจะมีปริมาณอนุภาคของอากาศ สภาวะความกดดันอากาศ และการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ตของดวงอาทิตย์ เป็นไปอย่างเหมาะสมเอื้ออำนวยให้เกิดการไอออไนซ์ขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่า ณ ความสูงในช่วงนี้มีความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนสูงสุด

การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์จะไปทำการไอออไนซ์อนุภาคในชั้นบรรยากาศ ซึ่งความรุนแรงของการไอออไนซ์ เป็นฟังก์ชันผกผันกับระยะจากดวงอาทิตย์ไปยังชั้นบรรยากาศโลก หรือพูดอีกนัยหนึ่งคือเป็นฟังก์ชันกับมุมซันิธ (Zenith angle) ของดวงอาทิตย์กับโลก ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อมุมซันิธน้อยลงระยะทางจากดวงอาทิตย์ก็จะเข้าใกล้โลกมากขึ้น และทำให้การไอออไนซ์เกิดรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์มากที่สุดจะอยู่รอบๆ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กของโลก รวมถึงบริเวณละติจูดต่ำด้วย แต่เนื่องจากแกนแม่เหล็กของโลกเลื่อนไปจากแกนหมุนของโลกเป็นมุมประมาณ 12° จึงทำให้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจะไม่ตรงกันกับเส้นศูนย์สูตรทางภูมิศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เส้นรุ้งแม่เหล็กบนแผนที่ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ [13]



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [9]

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยหลักๆ ได้ 3 ชั้น คือชั้น D, E และ F ตามระดับความสูง และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

2.1.2.1 ชั้น D

ชั้น D ซึ่งเป็นชั้นที่มีความสูงจากพื้นโลกต่ำที่สุด มีขอบเขตอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 กิโลเมตร ซึ่งจะปรากฏให้เห็นได้เฉพาะเวลากลางวัน และหายไปในเวลากลางคืน เนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ของอนุภาคมีค่าสูงสุด โดยมีค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์จะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 10^8 และ 10^{10} อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร [9] เป็นชั้นที่มีบทบาทต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ คือ จะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นที่ความถี่ MF, HF และ VHF และยังสะท้อนสัญญาณในช่วงความถี่ LF และ VLF เนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นนี้มีไม่เพียงพอ (ประมาณ 10^9 e/m³) และมีความถี่ในการชนกันของอิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลางที่อัตราที่สูง (ประมาณ 10^6 ครั้งต่อวินาที) จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อคลื่นวิทยุให้เลี้ยวเบนได้ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการลดทอนของคลื่นสัญญาณเมื่อเดินทางผ่านชั้นนี้ และเนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำนี้ทำให้ไม่สามารถศึกษาได้ด้วยวิธีไอโอโนซอนเด แต่ใช้เทคนิคอื่นได้ เช่น การกระจัดกระจายไม่รวมกัน (Incoherent scatter) การวัดโดยใช้จรวด Wave interaction และอื่นๆ

2.1.2.2 ชั้น E

ชั้น E เป็นชั้นที่วางตัวอยู่เหนือชั้น D ที่ความสูง 90 ถึง 140 กิโลเมตร มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากที่สุดที่ระดับความสูง 110 กิโลเมตร พบเห็นในเวลากลางวันเนื่องจากการไอออไนซ์ค่อนข้างมาก ส่วนในเวลากลางคืนมีการไอออไนซ์ที่น้อยมาก โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นนี้อยู่ในช่วงประมาณ 10^5 ถึง 4.5×10^5 e/m³ ในช่วงเวลากลางวัน และมีความหนาแน่นประมาณ 5×10^5 e/m³ ในเวลากลางคืน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งชั้น E นี้จะมีผลเพียงเล็กน้อยกับการสะท้อนของคลื่น HF ในเวลากลางวัน ในบางครั้งมีปรากฏการณ์การไอออไนซ์ที่ผิดปกติในชั้น E เรียกว่า Sporadic-E แทนด้วยสัญลักษณ์ Es โดยเกิดจากการแทรกสอดอย่างรุนแรงของคลื่นย่าน VHF และเป็นการเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น โดยปกติจะมีรูปแบบคล้ายก้อนเมฆมีลักษณะเป็นหย่อมๆ และจะเปลี่ยนแปลงขนาดตั้งแต่ 1 กิโลเมตร จนถึงหลายร้อยกิโลเมตร การเกิดขึ้น และความเข้มของการไอออไนซ์จะไม่มีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยการเกิดขึ้นนี้ไม่สามารถทำนายได้ และยังสามารถพบได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน หรือในฤดูใดๆ ก็ได้ ชั้น Es เป็นชั้นที่บางมากแต่มีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูง (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าเกือบ 10 เท่า ของชั้น E ปกติ) และจะปรากฏที่ใดก็ได้ในระยะความสูงตั้งแต่ 90-120 กิโลเมตร ซึ่งชั้น Es นี้มีความสำคัญในการสะท้อนคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำกว่า 100 เมกะเฮิรตซ์

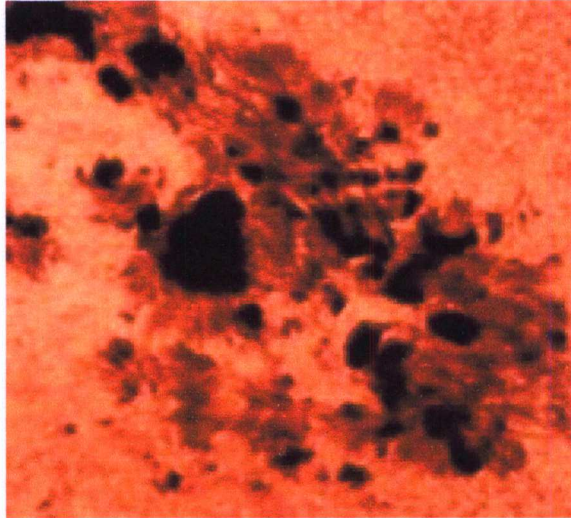
2.1.2.3 ชั้น F

ชั้น F ซึ่งเป็นชั้นย่อยบนสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการไอออไนซ์มากที่สุด และเป็นเพียงชั้นเดียวที่รักษาการไอออไนซ์โดยไม่ขึ้นกับวัน หรือฤดูกาลใดๆ ชั้น F เป็นชั้นที่อำนวยความสะดวกแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะทางไกลได้แม้ในยามกลางคืน การปรากฏขึ้นได้ของชั้น F ในเวลากลางคืนเนื่องมาจากว่าชั้น F เป็นชั้นบนสุดที่มีการไอออไนซ์สูงมาก ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์แล้วเหลืออยู่แม้ไม่ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์แล้วก็ตาม และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์มีค่าสูงในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอากาศมีไม่มากนัก ความสูงระดับนี้ ดังนั้นโมเลกุลเกือบทั้งหมดในชั้นนี้จึงเป็นโมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์ โดยอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ในการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นนี้ คือ อะตอมของออกซิเจน

ในช่วงเวลากลางวันชั้น F จะแยกออกเป็น 2 ชั้นคือชั้น F1 และ F2 โดยปรากฏการณ์นี้จะพบตลอดปีในบริเวณละติจูดต่ำ และปรากฏเฉพาะฤดูร้อนเท่านั้นในบริเวณละติจูดสูง โดยชั้น F1 จะวางตัวอยู่ในระดับความสูงประมาณ 140 ถึง 250 กิโลเมตร โดยมีค่าระดับความสูงเฉลี่ยคือ 220 กิโลเมตร ส่วนชั้น F2 เป็นชั้นที่วางตัวอยู่บนสุดโดยมีระดับความสูงอยู่ที่ 250 ถึง 400 กิโลเมตร โดยในช่วงเวลากลางวันค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F2 นี้จะมีค่ามากที่สุดในบรรดาชั้นย่อยอื่นๆ ทั้งหมดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ส่วนในช่วงเวลากลางคืนชั้น F1 และ F2 จะรวมตัวกันเป็นชั้น F และมีระดับความสูงประมาณ 300 กิโลเมตร โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงและความหนาแน่นของชั้น F2 นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น เวลา อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศ และรอบวัฏจักรสุริยะ เป็นต้น

2.2 จุดดับบนดวงอาทิตย์และวัฏจักรสุริยะ

ปริมาณความเข้มในการเกิดการไอออไนซ์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลา ระดับความสูง และตำแหน่งที่ตั้งบนโลกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot number) ด้วย



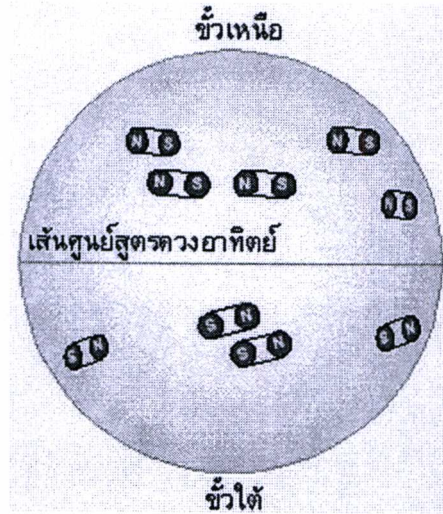
รูปที่ 2.6 จุดดับบนดวงอาทิตย์ที่ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [14]

จากรูปที่ 2.6 จุดดับหรือจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot) ที่รวมกลุ่มกันเป็นกระจุกใหญ่ สิ่งที่เราเห็นเป็นเม็ดละเอียดจำนวนมากในส่วนพื้นที่สว่างคือ แกรนูล (Granule) จุดดับบนดวงอาทิตย์ เป็นปรากฏการณ์บนพื้นผิวดวงอาทิตย์ที่สังเกตเห็นได้ง่ายที่สุด ถูกค้นพบมาตั้งแต่สมัยของกาลิเลโอแล้ว จุดดับบนดวงอาทิตย์เมื่อมองผ่านแผ่นกรองแสงจะมีลักษณะเป็นจุดสีดำขึ้นประปรายอยู่บนผิวหน้าของดวงอาทิตย์ ซึ่งสามารถมองเห็นได้ง่าย ๆ โดยการใช้นาฬิกาจับภาพจากกล้องโทรทรรศน์หรือกล้องสองตา จุดดับบนดวงอาทิตย์เกิดขึ้นที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ เช่นเดียวกับ แกรนูล (ลักษณะที่เป็นเม็ดคล้ายฟองที่เดือนพฤษภาคมบนผิวของดวงอาทิตย์) ขนาดของจุดดับมีตั้งแต่เท่ากับแกรนูลฟองเดียว หรืออาจจะใหญ่กว่านั้น และอาจมีการรวมกลุ่มกันเป็นกระจุกจนมีพื้นที่หลายพันล้านตารางกิโลเมตร โครงสร้างของจุดดับบนดวงอาทิตย์มีได้มีลักษณะดำมืดแต่เพียงอย่างเดียว หากพิจารณาดูดี ๆ แล้ว จะพบว่าแต่ละจุดจะมีลักษณะซ้อนกันสองชั้น โดย จุดดับชั้นใน (Umbra) จะมีสีดำเข้ม ส่วนจุดดับชั้นนอก (Penumbra) ซึ่งล้อมรอบอยู่จะมีลักษณะจางกว่าและมีรูปร่างเป็นเส้นในแนวรัศมี ดูเผิน ๆ แล้วจุดดับของดวงอาทิตย์จะคล้ายกับลูกตาของคน โดยจุดดับชั้นในแทนรูม่านตาส่วนชั้นนอกแทนม่านตา โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ส่วนจุดดับชั้นนอกมักมีพื้นที่มากกว่า บางครั้งอาจมากถึง 80% ของพื้นที่จุดดับทั้งหมด บริเวณจุดดับชั้นนอกเป็นบริเวณที่มีการไหลของแก๊สจากบริเวณจุดดับชั้นในไปสู่พื้นที่นอกจุดดับ เมื่อแก๊สไหลออกไปนอกจุดดับชั้นนอกแล้วก็จะเปลี่ยนทิศพุ่งขึ้นตั้ง

หากกับผิวของดวงอาทิตย์จนถึงชั้นโครโมสเฟียร์ (บรรยากาศที่อยู่เหนือพื้นผิวของดวงอาทิตย์) หลังจากนั้นจึงย้อนกลับพุ่งลงในใจกลางของจุดดับอีกครั้งเป็นวัฏจักรต่อไป

การกระจายตัวของจุดดับนั้น มักพบว่าจุดดับมักเกิดขึ้นเป็นคู่หรือรวมกลุ่มเป็นกระจุกใหญ่จำนวนมากๆ แต่จุดดับคู่จะพบได้มากกว่า ส่วนจุดดับที่ขึ้นเดี่ยวๆ จะไม่พบบ่อยนัก นอกจากนี้ยังพบว่าจุดดับบนดวงอาทิตย์มีการเกิดขึ้นและสลายตัวตลอดเวลา โดยปกติแล้วจุดดับแต่ละจุดจะมีอายุประมาณไม่เกินสองสัปดาห์ แต่ก็อาจมีบางจุดที่มีอายุยาวนานนับเดือนก็เป็นได้ ถึงแม้ว่าจุดดับชั้นในจะเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุดบนดวงอาทิตย์จนมองเห็นเป็นสีดำสนิท แต่มันก็ยังมีอุณหภูมิสูงถึง 4,000 เคลวิน ในความเป็นจริง แก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำนี้ก็จะมีความสว่างมาก แต่สาเหตุที่เราเห็นเป็นสีดำนั้นเนื่องจากพื้นผิวของดวงอาทิตย์โดยรอบจุดดับหรือโฟโตสเฟียร์มีความสว่างมากกว่ามาก เพราะมีอุณหภูมิสูงถึง 6,000 เคลวิน ส่วนบริเวณจุดดับชั้นนอกนั้นมีอุณหภูมิต่ำกว่าโฟโตสเฟียร์เพียงเล็กน้อย คือประมาณ 5,600 เคลวิน ในขณะที่ความสว่างของจุดดับบนดวงอาทิตย์จะน้อยกว่าที่อื่นๆ แต่สนามแม่เหล็กบริเวณนี้ก็มีความเข้มข้นสูงมาก เราพบว่าสนามแม่เหล็กจะมีทิศพุ่งออกจากจุดดับพร้อม ๆ กับนำเอาแก๊สร้อนจัดจากภายในพื้นผิวดวงอาทิตย์ขึ้นมาด้วย สนามแม่เหล็กที่จุดดับอาจมีความเข้มข้นสูงถึง 0.2 - 0.4 เทสลา (1 เทสลาเท่ากับ 10,000 เกาส์) รูปร่างและทิศทางของสนามแม่เหล็กจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของกลุ่มของจุดดับเหล่านี้ กล่าวคือ บริเวณที่มีจุดดับเป็นคู่ สนามแม่เหล็กจะพุ่งขึ้นออกจากจุดดับจุดหนึ่งสู่บรรยากาศชั้นบนเหนือโฟโตสเฟียร์ แล้วเลี้ยวโค้งวกกลับลงสู่จุดดับอีกจุดหนึ่งที่อยู่คู่กัน จุดดับสองจุดนี้จึงมีขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกันเสมอ เหมือนกับแม่เหล็กแบบเกือกม้าที่ติดอยู่บนผิวดวงอาทิตย์ เราเรียกสนามแม่เหล็กรูปร่างแบบนี้ว่า สนามแม่เหล็กแบบ ไบโพลาร์ (bipolar) บริเวณที่มีจุดดับรวมกลุ่มกันเป็นกระจุกขนาดใหญ่จะมีรูปร่างของสนามแม่เหล็กที่ซับซ้อนมากขึ้น แต่ยังคงเป็นสนามแม่เหล็กปิดเช่นเดียวกับสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ ส่วนจุดดับที่เป็นจุดเดี่ยวโดดๆ ไม่รวมกลุ่มหรือเข้าคู่กับจุดดับอื่นๆ สนามแม่เหล็กจะพุ่งออกจากจุดดับชั้นในและสาดออกไปสู่อวกาศโดยไม่วกกลับเข้ามา เรียกว่าเป็นสนามแม่เหล็กเปิด ซึ่งเป็นช่องทางที่มวลสารจำนวนมากดวงอาทิตย์พุ่งทะลักสู่อวกาศ และเป็นส่วนหนึ่งของการเกิดลมสุริยะ

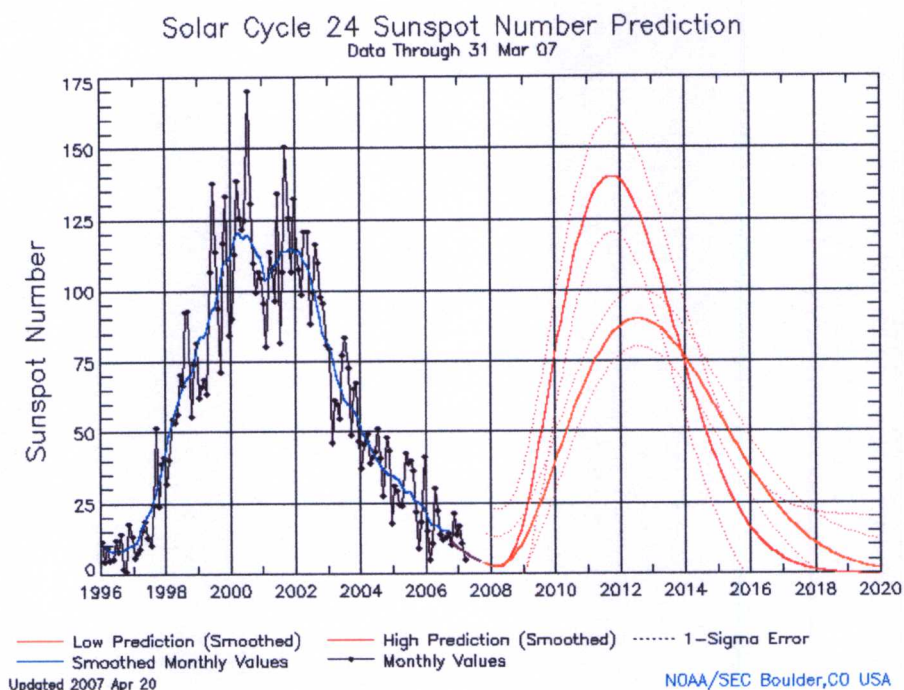
สนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์บนดวงอาทิตย์มีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจอย่างหนึ่งคือ ทุกๆ คู่ของจุดดับจะเรียงกันในแนวอนกึ่งขนานกับเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ เนื่องจากดวงอาทิตย์มีการหมุนรอบตัวเองด้วย ดังนั้นจุดดับสองจุดในแต่ละคู่จึงมีชื่อเรียกว่า จุดนำ และ จุดตาม เรามักพบว่าจุดนำของแต่ละคู่มักจะอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากกว่าจุดตามเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าสนามแม่เหล็กแบบไบโพลาร์ที่เกิดขึ้นในซีกดาวเดียวกันจะมีทิศทางตรงกันทั้งหมด และทิศทางของสนามแม่เหล็กของซีกเหนือและซีกใต้ของดวงอาทิตย์จะตรงข้ามกันเสมออีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 คู่ของจุดดับจะเรียงกันในแนวอนเกือบขนานกับเส้นศูนย์สูตรของดวงอาทิตย์ [14]

ปริมาณของจุดดับบนดวงอาทิตย์บางช่วงเวลาอาจมีเป็นจำนวนมาก แต่บางช่วงอาจไม่มีเลยแม้แต่จุดเดียว ความผันแปรนี้เป็นการผันแปรที่เป็นวัฏจักร มีคาบค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 8 ปี ถึง 16 ปี มีค่าเฉลี่ย 11.1 ปี คาบนี้เรียกว่า วัฏจักรสุริยะ หรือวัฏจักรของดวงอาทิตย์ (solar cycle) หากเราเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์กับเวลา โดยให้เวลาอยู่ในแนวอน และจำนวนจุดดับเป็นแนวตั้ง จะพบว่ารูปกราฟที่ได้คล้ายกับคลื่นรูปฟันเลื่อย โดยช่วงขาขึ้น (จากช่วงที่มีจุดดับน้อยที่สุดไปสู่ช่วงที่มีจุดดับมากที่สุด) จะชันกว่าช่วงขาลงเล็กน้อย โดยเฉลี่ยแล้วช่วงขาขึ้นจะใช้เวลาประมาณ 4.8 ปี ส่วนขาลงใช้เวลาประมาณ 6.2 ปี ดังแสดงในรูปที่ 2.8

จากการสำรวจดวงอาทิตย์ของนักดาราศาสตร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน นักดาราศาสตร์ยังได้พบว่า ปรากฏวัฏจักรที่ยาวประมาณ 80 ปีซ้อนอยู่บนคาบ 11.1 ปีนี้อีกด้วย นอกจากนี้วัฏจักรของจุดดับบนดวงอาทิตย์ก็ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอตลอด ในปี ค.ศ. 1645 ถึง 1715 วัฏจักรของดวงอาทิตย์ได้หยุดชะงักไปนานถึง 70 ปี เป็นช่วงที่รู้จักกันในชื่อของ ช่วงต่ำสุดมอนเดอร์ (Maunder minimum) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวแทบจะไม่มีจุดดับเกิดขึ้นเลย



รูปที่ 2.8 วัฏจักรสุริยะตั้งแต่ ค.ศ. 1996 ถึง ค.ศ. 2020 [15]

การเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ทางสุริยะ มีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ กล่าวคือ ที่ค่าความเข้มแสงอาทิตย์มีค่าสูงเป็นเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้นในแต่ละชั้นย่อยของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่ปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์มีค่าสูงกว่าปกติ

2.3 ทฤษฎีการส่งคลื่นสั้นในการสื่อสารระยะไกล

สัญญาณวิทยุของคลื่นสั้น หรือ เรียกอีกอย่างว่า คลื่นในย่าน HF (High of frequency) โดยมีย่านความถี่ตั้งแต่ 3-30 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเปรียบเสมือนกระจกที่สะท้อนคลื่นกลับมา ในเวลากลางวันจะใช้น้อยมากเนื่องจากจะมีการสะท้อนได้แค่ 100 กิโลเมตรเท่านั้น ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อยู่สูงเหนือชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ มีความสูงจากพื้นโลกตั้งแต่ 55.8 กิโลเมตร ถึง 483.6 กิโลเมตร คลื่นจะถูกสะท้อนเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง โดยปกติคลื่นวิทยุจะสะท้อนเมื่อเดินทางผ่านชั้นต่างๆของชั้นบรรยากาศเอตโมสเฟียร์ ซึ่งก็คือชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีความสูงของชั้นตั้งแต่ 100 กิโลเมตรขึ้นไป เมื่ออัตราส่วนของค่านีหักเหของ 2 ตัวกลางมีค่ามากพอคลื่นจะสามารถสะท้อนชั้นได้เปรียบเสมือนกับแสงที่สะท้อนกระจก [16]

บทบาทของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการแพร่ของคลื่น จะสามารถอธิบายได้จากการเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมในการสื่อสารตามความสูงต่างๆของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ถึงแม้ว่าจะมีหลายหลักการที่ใช้อธิบายวิธีการของ Heaviside และ Kennally แต่ก็มีผลต่างของผลที่ได้มา โดย Professor Appleton และผู้ร่วมวิจัย ได้ค้นพบว่าไม่ได้มีเพียงชั้นเดียวที่สามารถสะท้อนคลื่นได้ แต่มีถึงสองชั้นที่สามารถสะท้อนคลื่นได้ การทดลองแรกกับ Pulse wave ในปี ค.ศ. 1925 โดย Breit และ Tuve ในสหรัฐอเมริกา ซึ่งประสบความสำเร็จมากในการพิสูจน์ทฤษฎีที่สามารถนำไปใช้ได้ โดยที่คลื่นวิทยุความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถสื่อสารได้ระยะทาง 300 กิโลเมตร การกำหนดชื่อของชั้นบรรยากาศที่มีการไอออไนเซชันถูกกำหนดชื่อโดย E. V. Appleton โดยที่ชั้นต่ำสุดมีความสูงของชั้นตั้งแต่ 60-90 กิโลเมตร เรียกว่าชั้น D region ซึ่งไม่เป็นชั้นที่แน่นอนและเป็นส่วนหนึ่งของชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนโดยเกิดขึ้นในเวลาที่ไม่มีความเข้มแสงอาทิตย์ซึ่งทำให้เกิดการรวมกลับ (Recombination) อย่างรวดเร็ว โดยที่ในเวลากลางวันปริมาณการไอออไนเซชัน (Ionization) จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงอาทิตย์ และชั้นบรรยากาศจะมีการดูดซับพลังงานจากคลื่นวิทยุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความถี่ในย่าน 3 เมกะเฮิร์ตซ์ และที่ความถี่ 7 เมกะเฮิร์ตซ์

การสื่อสารในระยะไกล จะใช้การไอออไนเซชันของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพื่อเป็นประโยชน์ในการสะท้อนคลื่นวิทยุ ย่านของคลื่นวิทยุที่นำไปใช้ ได้แก่ย่าน 3.5 , 7 , 14 , 21 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยที่ความสูงของชั้นจะมีค่าที่ไม่คงที่โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความสูงจาก 200 ถึง 400 กิโลเมตรหรืออาจจะถึง 500 กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับช่วงเวลาของปี ตำแหน่งของเส้นรุ้ง และช่วงเวลาใน 1 วัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง วัฏจักรสุริยะ (Solar cycle) ที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และ ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยที่ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 จะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามสมการที่ 2.4

$$foF2 = 8.98\sqrt{N_{\max}} \quad \text{เฮิร์ตซ์} \quad (2.4)$$

โดยที่ค่า $foF2$ คือความถี่วิกฤตของชั้น F2 และ N_{\max} คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (e/m^3) [12] ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตของแต่ละชั้นจะขึ้นอยู่กับฤดูกาล และวัฏจักรสุริยะ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.5 และ 2.6 ดังนี้

$$foE = 0.9[(180 + 1.44R)\cos\chi]^{0.25} \quad \text{เมกะเฮิร์ตซ์} \quad (2.5)$$

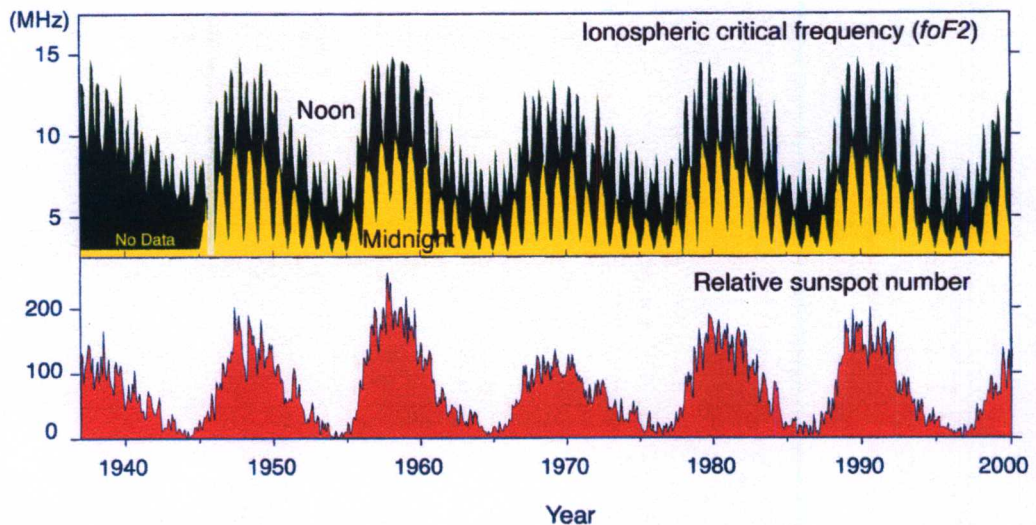
$$foF1 = (4.3 + 0.01R)\cos^{0.2}\chi \quad \text{เมกะเฮิร์ตซ์} \quad (2.6)$$

โดยที่ค่า f_oE คือค่าความถี่วิกฤตของชั้น E ค่า f_oF1 คือค่าความถี่วิกฤตของชั้น F1 และค่า R คือจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ และ χ คือมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ หรือเป็นมุมที่วัดจากจุดกลางฟ้าซึ่งสัมพันธ์กับมุมเงย ดังนี้

$$\text{Zenith} = 90^\circ - \text{มุมเงย} \quad (2.7)$$

โดยที่มุมเงยคือมุมที่วัดจากระนาบที่ผิวโลก ไปยังดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นมุมที่รังสีแสงอาทิตย์กระทำกับระนาบที่ผิวโลกนั่นเอง

ซึ่งจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ กับความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตามกันดังรูปที่ 2.9 ช่วงเวลาของวัฏจักรสุริยะจะมีช่วงระยะเวลา 11 ปีในแต่ละรอบของวัฏจักร



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 กับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ [1]

ในเวลากลางวันชั้น D จะดูดซับความถี่ย่าน 1.8 เมกะเฮิรตซ์มาก หรือ เรียกอีกอย่างว่าย่านความยาวคลื่น 166 เมตร ถ้ามีมุมการสะท้อนที่มากพอจะทำให้สัญญาณที่ส่งขึ้นไปจะไม่ทะลุผ่านชั้น F ไปได้เลย และในการสื่อสารในเวลากลางวันจะจำกัดขอบเขตที่คลื่นดินส่งไปถึง ในเวลากลางคืนชั้น D จะหายไปอย่างรวดเร็วและในการติดต่อสื่อสารจะติดต่อสื่อสารโดยใช้ชั้น F2 ข้อจำกัดของการแพร่ของคลื่นในย่านนี้เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นตัวกลาง ในการเดินทางของคลื่นและสัญญาณรบกวนที่เกิดจากมนุษย์ ในเขตร้อนชื้นและพื้นที่บริเวณละติจูดกลาง (Mid latitude) จะมีพายุเมฆซึ่งเป็นเหตุให้ระดับสัญญาณมีค่าสูงในหน้าร้อน และในหน้าหนาวช่วงเวลาในตอนเย็นจะเหมาะที่จะใช้ความถี่ย่านนี้ในการติดต่อสื่อสารในระยะทางไกลๆ แต่ว่า

สายอากาศที่ใช้รับสัญญาณนั้นต้องสามารถรับสัญญาณที่ต้องการได้ดีและลดจำนวนของสัญญาณรบกวนที่รับมาได้ด้วย

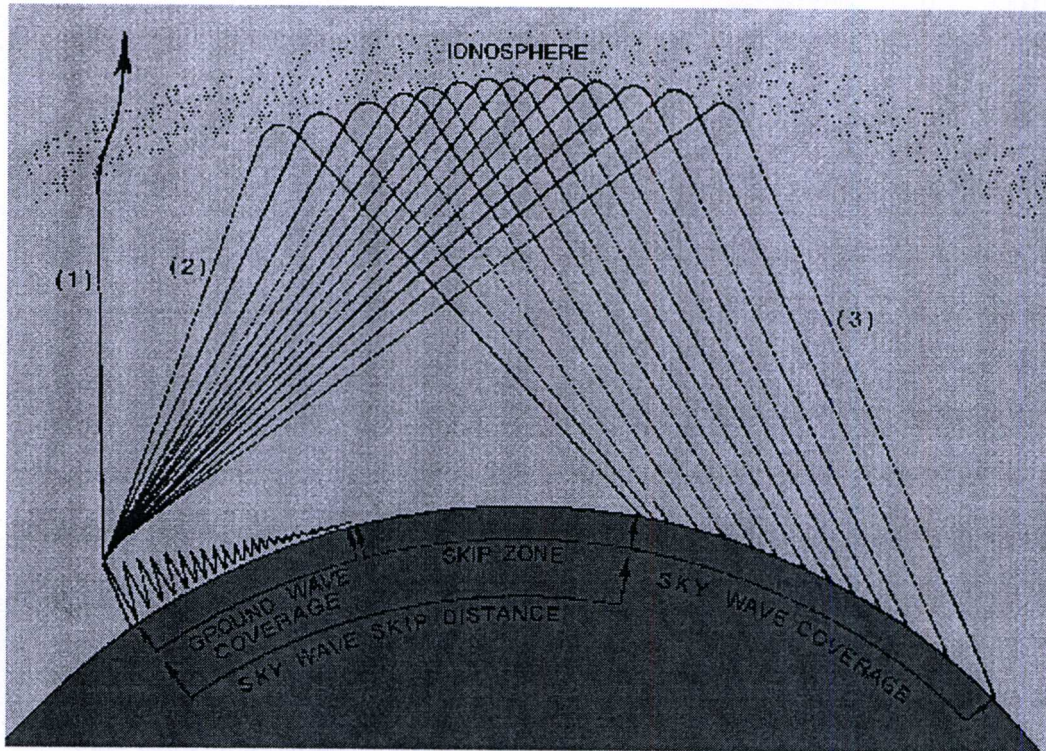
ความถี่ในย่าน 3.5 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือเรียกอีกอย่างว่า ย่านความยาวคลื่น 85.7 เมตร เป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดของย่าน HF ซึ่งจะมีคุณสมบัติคล้ายกับกับความถี่ย่าน 1.8 เมกะเฮิร์ตซ์ คือในเวลากลางวันจะถูกดูดซับโดยชั้น D มากแต่จะไม่มากเท่ากับในย่าน 1.8 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อส่งสัญญาณด้วยมุมที่มีค่าสูงสัญญาณจะสามารถทะลุชั้น E และ ชั้น F ไปได้ โดยปกติตามทฤษฎีแล้วระยะทางการสื่อสารของความถี่ในย่านนี้ในเวลากลางวันจะจำกัดอยู่ที่ 400 กิโลเมตร สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับความถี่ในย่านนี้ก็เหมือนกับการเกิดกับย่าน 1.8 เมกะเฮิร์ตซ์ คือเกิดจากการรบกวนสัญญาณของชั้นบรรยากาศ ความถี่ที่ใช้ประโยชน์ในการสื่อสารในเวลากลางวันได้ระยะทางไกลถึง 800 กิโลเมตรโดยใช้ชั้น E และ ชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการสะท้อนคลื่นนั้นคือความถี่ย่าน 7 เมกะเฮิร์ตซ์ และการใช้ความถี่ในย่านนี้ในการสื่อสารให้ได้ระยะทางไกลๆที่ใช้กันทั่วโลกนั้นจะใช้ชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการสะท้อนคลื่น

ความถี่ที่มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถใช้ในการสื่อสารได้ทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืนคือ ความถี่ย่าน 10 เมกะเฮิร์ตซ์หรือย่าน 30 เมตร โดยปกติแล้วสามารถสื่อสารได้ระยะไกลถึง 3000 กิโลเมตรในเวลากลางวันและใช้กันทั่วโลก โดยจะใช้ชั้น F2 ในการสะท้อนคลื่นตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โดยที่หน่วยงาน ITU (International Telecommunication Union) ได้จัดสรรช่วงความถี่ที่ใช้ตั้งแต่ 10,100 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 10,150 กิโลเฮิร์ตซ์สำหรับผู้ใช้งานวิทยุสมัครเล่นใน 3 พื้นที่ ขณะที่ในหลายๆพื้นที่จะใช้กับแฮมเรดิโอ (Ham radio)

นอกจากนี้การสื่อสารโดยใช้คลื่นสั้นจะประหยัดกว่าการสื่อสารแบบดาวเทียมเนื่องจากไม่ต้องจองช่องสัญญาณในการเข้าถึง สามารถส่งข้อมูลไปกับคลื่นวิทยุไปได้เลยในระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงมีการศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์เพื่อใช้ในการสื่อสารโดยใช้คลื่นสั้นเนื่องจากไม่มีความซับซ้อนในการส่งจึงทำให้ข้อมูลที่ส่งไปนั้นต้องไม่เป็นข้อมูลที่เกี่ยวกับความลับ เพราะว่า คนที่มีเครื่องรับที่ตั้งอยู่ในระยะที่สามารถรับคลื่นที่เราส่งไปได้ แค่รับเครื่องรับให้รับความถี่เดียวกันกับที่เราส่งก็จะสามารถทราบได้ว่าเราส่งข้อมูลอะไรไป เมื่อมีปัญหาในการรับสัญญาณเกิดขึ้นเนื่องจากมีระดับสัญญาณที่ต่ำ ในการแก้ปัญหาของการแพร่ของคลื่นจะทำโดยการใช้ ไลควอร์ซิตี (Diversity) ซึ่งการจัดสรรในระบบสื่อสารแบบไร้สายจะทำการจัดความถี่ให้ครอบคลุมในย่านความถี่สูง (High of frequency) หรือ คลื่นสั้น (Short wave) ผู้ให้บริการจะสามารถเลือกช่องสัญญาณเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในทุกๆเวลาที่ให้บริการ

ในสภาวะปกติการส่งข้อมูล โดยใช้ความถี่ย่าน HF จะไม่สามารถส่งสัญญาณได้ไกลถึง 200 กิโลเมตร เพราะว่าการส่งสัญญาณคลื่นดิน (Ground wave) จะถูกบ่งสัญญาณด้วยความโค้งของโลก รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางการสื่อสารโดยใช้คลื่นฟ้า (Sky wave) โดยที่ระยะกระโดดข้าม (Skip distance) คือ ระยะทางที่เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณครั้งแรกจากจุดที่

ส่งถึงจุดที่สามารถรับสัญญาณได้ (ระยะทางนี้จะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ทำการส่ง มุมที่ใช้ในการส่ง และ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นตัวสะท้อนคลื่น) และ ระยะทางที่คลื่นดินส่งไปถึง

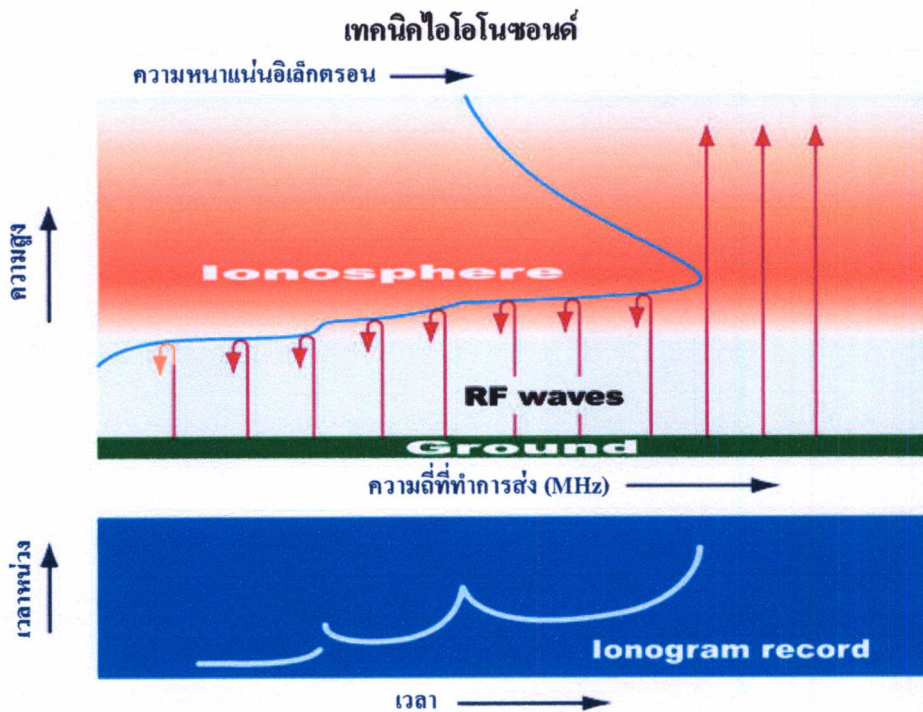


รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของ สคิปโซน (skip zone) ระยะทางของการสื่อสารโดยใช้คลื่นฟ้าและ ระยะทางของคลื่นดิน [16]

สคิปโซน คือ ระยะทางจากจุดที่สามารถรับคลื่นดินได้ถึงจุดแรกที่สะท้อนกลับมาของคลื่นฟ้า โดยที่ระยะทางนี้เป็นระยะที่ไม่สามารถรับสัญญาณได้หรือว่ามีระดับสัญญาณอ่อนมาก ระยะของสคิปโซนนี้จะขึ้นอยู่กับระยะทางของคลื่นดินและระยะทางของคลื่นฟ้า ถ้าในการสื่อสารคลื่นฟ้าและคลื่นดิน เกิดมีค่าใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการจางหาย (Fading) ที่รุนแรงของสัญญาณโดยที่สัญญาณจากคลื่นฟ้าจะแรงกว่าสัญญาณจากคลื่นดิน และมีเฟสที่ต่างกัน

2.4 เทคนิคไอโอโนซอนด์

เทคนิคไอโอโนซอนด์ (หรือเรียกอีกชื่อว่า Ionospheric sounder) เป็นเทคนิคดั้งเดิมที่ใช้ในการตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เทคนิคนี้ยังคงถูกใช้อย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยมีหลักการคล้ายคลึงกับเรดาร์ กล่าวคือ เมื่อมีการส่งคลื่นไปสะท้อนกับวัตถุชั้นใดชั้นหนึ่งแล้ว จะสามารถทราบได้ว่าวัตถุชั้นนั้นอยู่ห่างจากจุดที่ส่งคลื่นไปสะท้อนนั้นเป็นระยะทางเท่าใด โดยการคำนวณเวลาที่คลื่นเดินทางไปและกลับ แต่เทคนิคไอโอโนซอนด์นั้นจะใช้ความถี่ในย่านที่มีค่าไม่สูงนัก และสามารถสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กลับมายังสายอากาศรับได้ และมีการส่งคลื่นแบบต่อเนื่องด้วย โดยในรูปที่ 2.11 แสดงภาพจำลองของการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์



รูปที่ 2.11 ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยใช้เทคนิคไอโอโนซอนด์ [17]

การหาความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยสถานีการตรวจวัดจะทำการส่งคลื่นความถี่ย่าน HF ที่มีค่าตั้งแต่ 2 - 30 เมกะเฮิรตซ์ โดยการส่งและรับคลื่นจะทำการส่ง และรับคลื่นอย่างต่อเนื่อง โดยการมอดูเลชันจะใช้เทคนิคการมอดูเลชันคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous wave – frequency modulation) โดยมีการเพิ่มความถี่แบบเชิงเส้นตามเวลา คลื่นที่ส่งขึ้นไปจะไป

สะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีกลุ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนโดยมีสายอากาศที่รับ และส่งวางเป็นรูปกากบาทกันเป็นโดม และจากนั้นจะทำการคำนวณเวลาหน่วงในการเดินทางของคลื่น และทำการพล็อตเป็นภาพไอโอโนแกรม ซึ่งการคำนวณเวลาหน่วงสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.8

$$\Delta t = \frac{2}{c} h' \quad (2.8)$$

โดยที่ค่า Δt คือค่าหน่วงเวลา ส่วนค่า h' คือค่าความสูงของชั้นบรรยากาศ และค่า c คือความเร็วแสง มีค่า $c = 3 \times 10^8$ หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

2.5 แนวคิดและหลักการคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ปริมาณอิเล็กตรอนรวม (TEC) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นตัวกลางแบบกระจายตามความถี่ที่ส่งผลต่อสัญญาณดาวเทียมจีทีเอส ทำให้เกิดการประวิงกลุ่ม (Group delay) และ เฟสล้ำหน้า (Phase advance) ส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ จากดาวเทียมจีทีเอสไปยังเครื่องรับภาคพื้นดิน ปริมาณอิเล็กตรอนรวม คำนวณได้จากผลต่างการประวิงของสัญญาณจีทีเอส 2 ความถี่ คือ $f_1 = 1575.42$ เมกะเฮิร์ตซ์ และ $f_2 = 1227.60$ เมกะเฮิร์ตซ์ การรับความถี่ทั้งสองความถี่จากดาวเทียมจีทีเอส สัญญาณที่เดินทางมาถึงเครื่องรับของทั้งสองความถี่นั้นจะมีการประวิงไม่เท่ากันเนื่องจากความถี่ต่างกันจะได้รับผลจากค่าดัชนีการหักเหของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่างกันด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ใช้ระยะทางและเวลาในการเดินทางของคลื่นสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มาถึงเครื่องรับเพิ่มขึ้นและมีเฟสเปลี่ยนไปด้วย

เนื่องจากการคำนวณหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม นั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าระยะทางเทียม (Pseudorange) ที่แตกต่างกัน (P_1, P_2) และ ค่าเฟสของสัญญาณที่แตกต่างกัน (L_1, L_2) โดยที่ ค่า k คือ ค่าคงที่การหักเห ของชั้นไอโอโนสเฟียร์มีค่าเท่ากับ $80.62 \text{ (m}^3/\text{s}^2)$ [18] โดยเก็บผล TEC ในรูปแบบของไฟล์ RINEX ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของ $P_1, P_2, L_1, L_2, \alpha$ และ ปริมาณอิเล็กตรอนรวมวิถีเฉียง (TEC_{slp}) ซึ่งในขั้นต้นจะกล่าวถึงการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมวิถีเฉียง (Slant path TEC_{slp}) ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$TEC_{slp} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (P_2 - P_1) \quad (2.9)$$

$$TEC_{sl} = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) \quad (2.10)$$

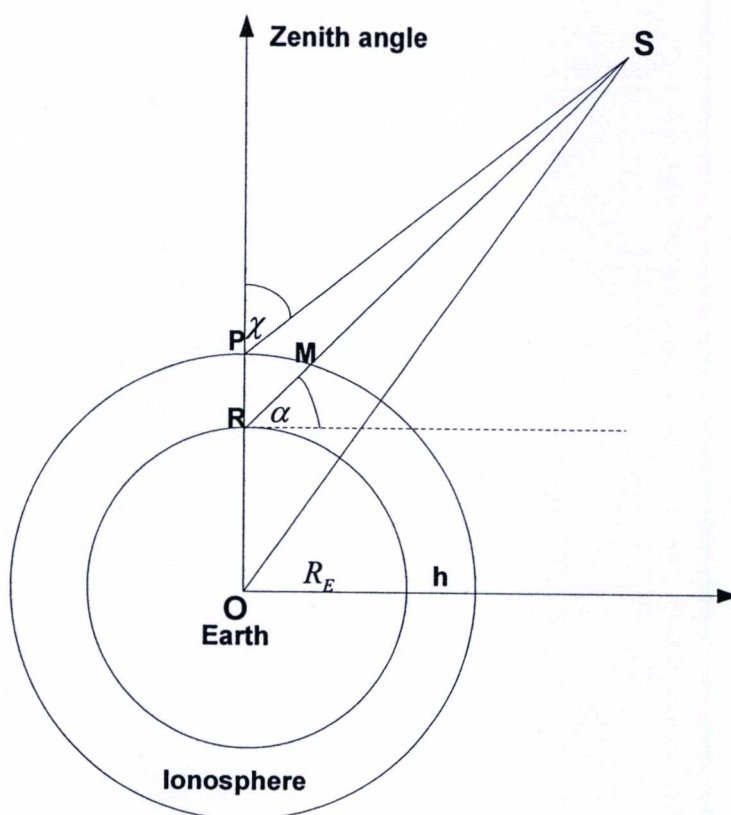
ซึ่งจากสมการที่ (2.9) และ (2.10) ค่า TEC_{slp} คือ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมวิถีเฉียงโดยใช้รหัส P (P code) ในการคำนวณ และ ค่า TEC_{sl} คือ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมวิถีเฉียงโดยใช้เฟสคลื่นพาห์ในการคำนวณ ค่า f_1 และ f_2 คือค่าความถี่คลื่นพาห์ ($f_1 = 1575.42$ เมกะเฮิร์ตซ์ และ $f_2 = 1227.60$ เมกะเฮิร์ตซ์) ค่า P_1 และ P_2 คือค่าระยะทางเทียมรหัส P (P code pseudoranges) ค่า L_1 และ L_2 คือค่าเฟสคลื่นพาห์ ส่วนค่า λ_1 และ λ_2 เป็นค่าความยาวคลื่น (λ_1 ประมาณ 19 เซนติเมตร และ λ_2 ประมาณ 24.4 เซนติเมตร) [19]

โดยปกติแล้วปริมาณ TEC จะถูกวัดในหน่วยของ 10^{16} อิเล็กตรอนต่อตารางเมตร (el/m^2) หรือเรียกอีกอย่างว่า TEC Unit (TECU) และในแบบจำลองที่นักวิจัยต่างๆ ได้ทำการศึกษาจะเป็นการใช้ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวตั้ง หรือปริมาณอิเล็กตรอนรวมที่วัดจากเส้นทางดาวเทียมอยู่ที่ตำแหน่งมุมเซนทิเป็นศูนย์หรืออยู่ในแนวเดียวกันกับดาวเทียม เนื่องจากในการวัดค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมนั้น ข้อมูลที่วัดได้จะอยู่ในวิถีเฉียง (Slant path TEC) หรือเส้นทางที่คลื่นเดินทางจริงระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียมจึงต้องทำการแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม ให้อยู่ในแนวตั้ง (Vertical TEC) เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันกับแบบจำลองอื่นๆ ในการแปลงค่า TEC ในวิถีเฉียง ให้อยู่ในแนวตั้งทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$TEC_v = TEC_{sl} \times \cos \chi \quad (2.11)$$

$$\chi = \arcsin \left(\frac{R_E \cos \alpha}{R_E + h} \right) \quad (2.12)$$

โดยได้แสดงรูปความสัมพันธ์ของมุมเงยของเครื่องรับ (α) มุมเซนทิที่จุดเริ่มของชั้นไอโอโนสเฟียร์ P (χ) ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (h) ที่ได้จากการประมาณมีค่า 400 กิโลเมตร และ R_E คือรัศมีเฉลี่ยของโลก (มีค่าประมาณ 6,371 กิโลเมตร) ขณะที่ค่า $\cos \chi$ เรียกอีกอย่างว่า Slant Factor (SF) [18]



รูปที่ 2.12 เรขาคณิตของดาวเทียมจีพีเอส เครื่องรับ (R) และ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [18]

จากรูปที่ 2.12 แสดงการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในแนวตั้ง ดังสมการที่ (2.11) ซึ่ง O คือ จุดศูนย์กลางของโลก R คือตำแหน่งเครื่องรับ S คือตำแหน่งดาวเทียม GPS P แทนจุดอ้างอิงที่เส้น TEC_V ลากผ่าน M แทนจุดอ้างอิงที่เส้น TEC_s ลากผ่าน

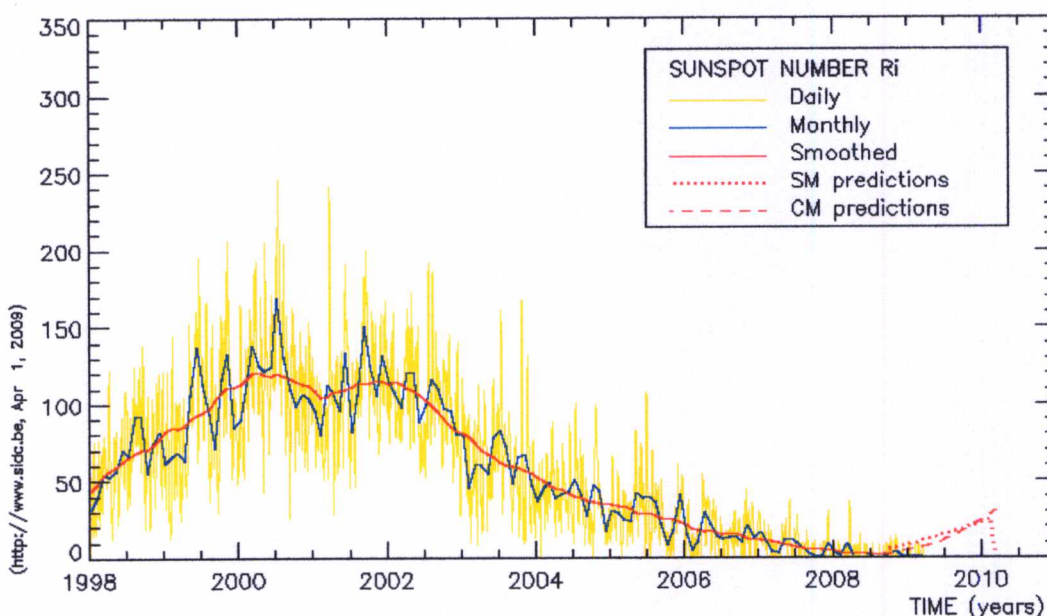
2.6 แนวคิดและหลักการคำนวณค่ากลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากการศึกษาค้นคว้าได้มีผู้วิจัยในต่างประเทศ ได้ทำการหาค่ากลุ่มความหนาหรือค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (τ) [1]-[7] โดยใช้การคำนวณจากค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม (TEC) และ ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ($NmF2$) ซึ่งผู้ที่ทำการศึกษาค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ได้สร้างสมการความสัมพันธ์เพื่อหาค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 โดยหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.13)

$$NmF2 = 1.24 (foF2)^2 \times 10^{10} \quad \text{el/m}^3 \quad (2.13)$$

$$\tau = TEC / NmF2 \quad \text{km} \quad (2.14)$$

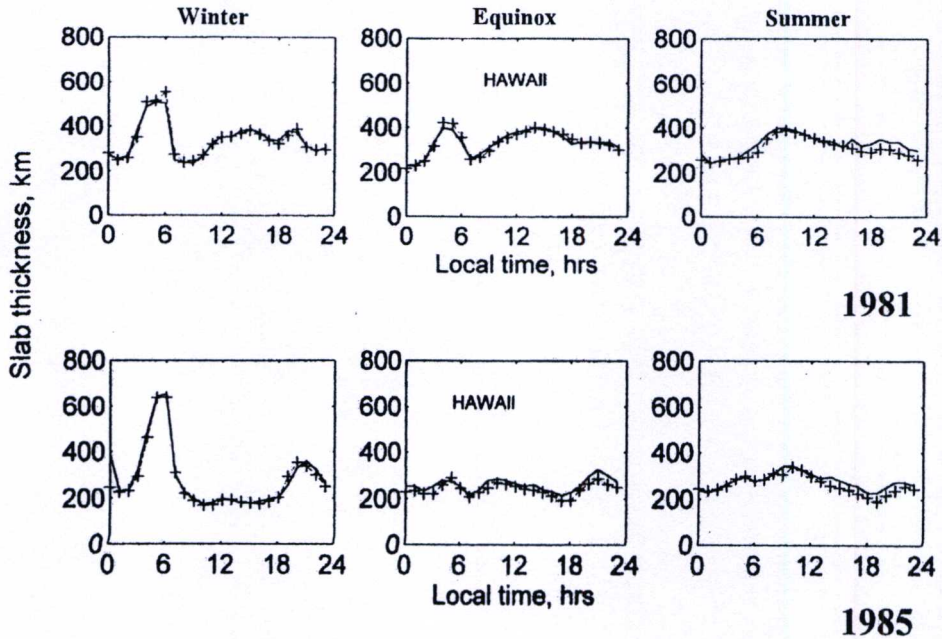
โดยที่ค่า NmF2 มีหน่วยเป็น e/m^3 ค่า τ มีหน่วยเป็นกิโลเมตร และค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีหน่วยเป็น MHz ซึ่งค่า τ นี้มีความสำคัญในการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นอิเล็กตรอน และการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของชั้นบรรยากาศด้วย [4] ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 ซึ่งเป็นช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าลดลง แสดงแบบจำลองจุดดับบนดวงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.13 และปริมาณของจุดดับบนดวงอาทิตย์ จะส่งผลกับค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแถบเส้นศูนย์สูตรด้วย [1]



รูปที่ 2.13 แบบจำลองจุดดับบนดวงอาทิตย์ในช่วงปี ค.ศ. 1998 ถึง 2010 [20]

ซึ่งความผิดปกติของค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะเกิดในในช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุดและต่ำที่สุด และการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดด้วย โดยที่ในรูปที่ 2.14 แสดงค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii ซึ่งอยู่ในแถบละติจูดต่ำเช่นเดียวกับประเทศไทย โดยตั้งอยู่ที่ตำแหน่ง (19° N, 206° E) ในช่วงเวลาที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุดในปี ค.ศ. 1981 และ ในช่วงเวลาที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดในปี ค.ศ. 1985 ตามลำดับ [1] ซึ่งในช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำที่สุด (1985) นั้น ค่าความหนาที่สูงที่สุดของชั้น

บรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii ในช่วงฤดูกาล Winter ในเวลา 06.00 น. จะมีค่าสูงกว่าในช่วงที่ ปริมาณจุดดับของดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด (1981)



รูปที่ 2.14 ค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ Hawaii (19° N, 206° E) ในช่วงเวลาที่ ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูงสุด (ค.ศ. 1981) และ ต่ำสุด (ค.ศ. 1985) ตามลำดับ

โดยที่ค่า τ ในแถบละติจูดต่ำนี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนที่ดวงอาทิตย์ขึ้น คือในเวลา 05.00 น. และมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 06.00 น. และ หลังจากนั้นจะลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่เวลา ประมาณ 07.00 น. เนื่องจาก ผลของการเคลื่อนที่ลงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในชั้นต่ำ เมื่อลมที่เป็น กลาง (Neutral wind) ยังคงดันชั้นไอโอโนสเฟียร์ในชั้นสูงให้มีความหนาเพิ่ม [21]-[23] หรือ อธิบายได้ จาก การที่ค่าพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ คือ ค่า ปริมาณอิเล็กตรอนรวม มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กันกับค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ของชั้น F2 ณ เวลานั้น โดยที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในเวลาก่อนดวงอาทิตย์ขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ยังคงมีค่าลดลง

บทที่ 3

วิธีการศึกษาวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาเรื่องกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต้องอาศัยความสัมพันธ์ของความถี่วิกฤตของชั้น F2 และ ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อุปกรณ์ในการวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนที่ทำกรวัดเก็บข้อมูลในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้แก่ อุปกรณ์วัดความถี่วิกฤตของชั้น F2 และ อุปกรณ์วัดปริมาณอิเล็กตรอนรวม

3.1.1 อุปกรณ์วัดความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่เวลาต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้ดำเนินการโดยใช้เครื่องรับและส่งคลื่นในย่าน HF รุ่น SKI-96092 FM/CW Radar ซึ่งติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ที่ตำแหน่ง เส้นลองจิจูด 99.3 องศาตะวันออก และเส้นละติจูด 10.7 องศาเหนือ หรือเทียบเท่ากับ ตำแหน่งเส้นละติจูดแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ ซึ่งเป็นสถานีหนึ่งในโครงการ SEALION [39] โดยหลักการของเครื่องจะทำการส่ง และรับคลื่นในย่าน HF ผ่านสายอากาศ จากนั้นทำการรับคลื่นที่สะท้อนกลับเข้ามายังเครื่องรับ จะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นภาพไอโอโนแกรมโดยเครื่องจะทำการบันทึกข้อมูลภาพเป็นไฟล์ PNG ทุกๆ 15 นาที ตั้งแต่เดือนมกราคม 2547 ถึงเดือน ธันวาคม 2549 เพื่อนำข้อมูลที่เป็นไฟล์ภาพไอโอโนแกรมนี้ มาศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 และนำค่า foF2 ที่ได้ไปคำนวณหาค่า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (N_mF2) ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของเครื่องมือในการวัดค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องมือในการวัดความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่ใช้ในการทดลอง [24]

ระบบ	Frequency Modulated-Continuous Wave (FM-CW) with pseudo-random Tx/Rx switching
เครื่องรับและส่งคลื่น	SKI-96092 FM/CW Radar
กำลังสูงสุดของเครื่องส่ง	20 วัตต์
กำลังเฉลี่ยของเครื่องส่ง	10 วัตต์
ย่านความถี่	2 ถึง 30 เมกะเฮิรตซ์
อัตราการเพิ่มความถี่	100 กิโลเฮิรตซ์ ต่อ วินาที
รอบการทำงาน	5 นาที
เสาอากาศ	สูง 27 เมตร
ชนิดสายอากาศ	Folded Dipole 2 ชั้น มีโพลาริซตั้งฉากต่อกัน
ตำแหน่งของสถานี	เส้นละติจูด 10.7 องศาเหนือ ตำแหน่ง เส้นลองจิจูด 99.37 องศาตะวันออก เส้นละติจูดแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ

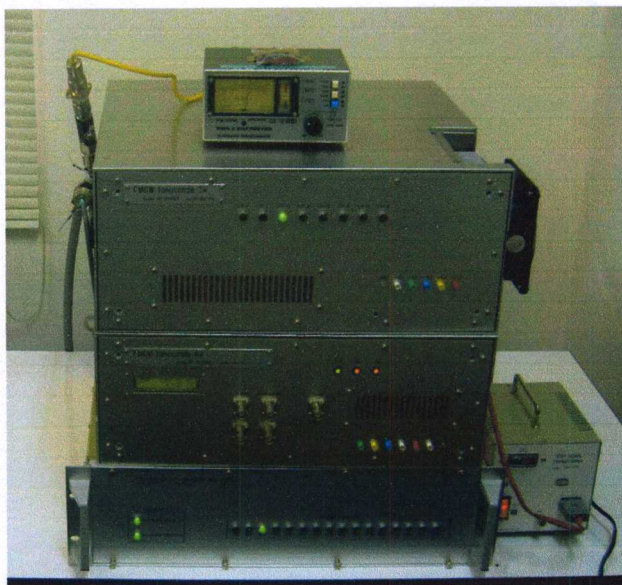
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพารามิเตอร์ f_oF2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนคือ (1) สายอากาศ (2) ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ และ (3) คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

3.1.1.1 สายอากาศ

เป็นสายอากาศชนิดโฟลด์ดีปโพล (Folded dipole) 2 ชั้น วางตัดขวางกันเป็นโดมโดยใช้เสาที่มีความสูง 27 เมตรเป็นตัวยึดสายอากาศ (รูปที่ 3.1) ซึ่งต้องใช้เสาที่มีความสูง 27 เมตร ก็เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ เป็นต้น โดยเสานี้ยังมีความสูงมากก็จะยิ่งดี แต่เนื่องจากที่สถานีชุมพรนั้นอยู่ใกล้กับสนามบินจึงทำการติดตั้งเสาสูงเพียง 27 เมตร เท่านั้น เพื่อไม่ให้เกิดขวางทางขึ้น-ลงของเครื่องบิน ส่วนสายอากาศชั้นที่ทำการส่งคลื่นขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะวางตั้งฉากกับสายอากาศชั้นที่ทำการรับคลื่นที่สะท้อนลงมายังโลก



รูปที่ 3.1 สายอากาศโพลเค็ดไดโพล [25]



รูปที่ 3.2 เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar [25]

3.1.1.2 ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ

เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar จะทำการส่งและรับคลื่นในย่านความถี่ตั้งแต่ 2 – 30 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีการส่งความถี่แบบต่อเนื่อง (Continuous wave) และมีอัตราการเพิ่มความถี่ที่ส่งขึ้นไปในอัตรา 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ซึ่งใน 1 รอบของการทำงานจะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาที จากนั้นจะส่งข้อมูลซึ่งเป็นภาพไอโอโนแกรมไปทำการบันทึกที่คอมพิวเตอร์แล้วจะทำการปรับสัญญาณนาฬิกา (Clock) ของเครื่องใหม่ในทุกๆรอบของการทำงาน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรมในทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับแสดงในรูปแบบที่ 3.2

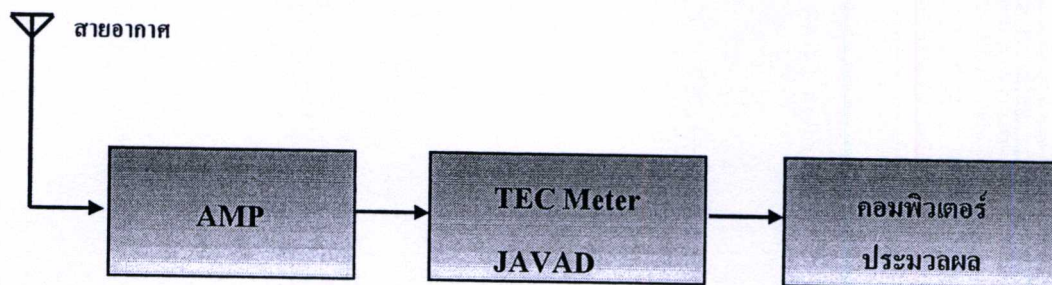
3.1.1.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลมีจำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องแรกทำการติดตั้งไว้ที่สถาบันเทคโนโลยีเข้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ซึ่งเป็นสถานที่ตั้งสถานีไอโอโนซอนด์เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับ มาทำการคำนวณเวลาหน่วงของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับที่ทำการบันทึกค่าทุกๆ 15 นาที มาทำการสร้างเป็นภาพไอโอโนแกรม โดยมีการเก็บภาพเป็นไฟล์ .PNG จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่งที่ติดตั้งไว้ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการดึงข้อมูลไฟล์ภาพไอโอโนแกรมที่บันทึกไว้ ณ สถานีชุมพร มาเก็บไว้ในเครื่อง เพื่อทำการเก็บ และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม Special scaling ต่อไป โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม Special scaling เพื่อทำการเก็บวัดค่าพารามิเตอร์ f_oF_2 จากไฟล์ภาพไอโอโนแกรม

3.1.2 อุปกรณ์วัดปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในการศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้ดำเนินการโดยใช้ชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ซึ่งผลิตโดยบริษัท JAVAD ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งถูกติดตั้ง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ที่ตำแหน่ง เส้นละติจูด 10.7 องศาเหนือ เส้นลองจิจูด 99.3 องศาตะวันออก ตำแหน่งเส้นละติจูดแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลสัญญาณจากดาวเทียม GPS ช่วงระยะเวลา 3 ปี ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวม ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวมจากสัญญาณดาวเทียม GPS ในย่านความถี่ 1575.42 MHz และ 1227.12 MHz ที่เกิดขึ้นในระหว่างวัน ในแต่ละเดือน ตามฤดูกาล และ ในแต่ละปี ต่อไป บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ในการหาค่าปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กทรอนิกส์รวมในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

ส่วนประกอบดังนี้ (1) สายอากาศ (2) เครื่องรับสัญญาณ GPS และ (3) คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลค่า TEC ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์การวัด TEC

3.1.2.1 สายอากาศ

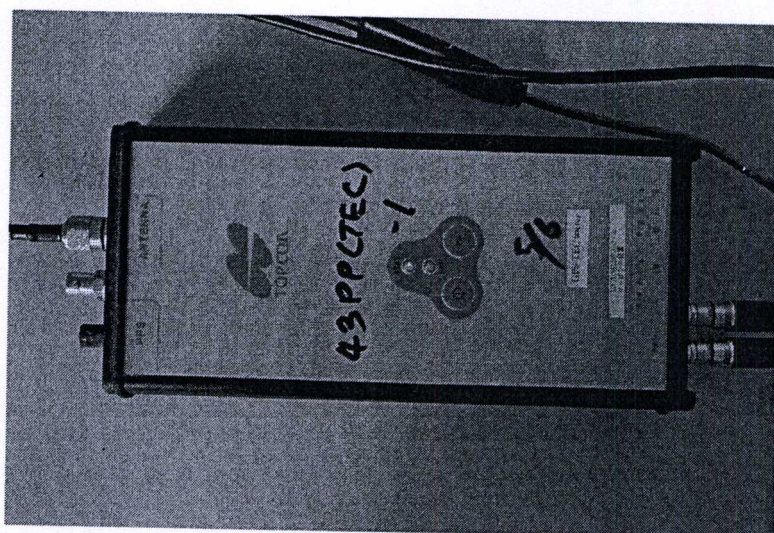
สายอากาศที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นสายอากาศชนิดไมโครสตริป (Microstrip antenna) ที่มีโพลาไรซ์ของคลื่นแบบวงกลมหมุนขวา (Right-handed circular polarized) เนื่องด้วยสัญญาณจากดาวเทียมเป็นแบบหมุนวนขวา สายอากาศถูกติดตั้งอยู่ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขต ชุมพร ประเทศไทย ซึ่งเป็นบริเวณพื้นที่ที่ไม่มีสิ่งกีดขวางรอบทิศทาง เป็นมุมเงยสูงกว่า 20 องศา และไม่ใกล้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อม ทำหน้าที่รับสัญญาณจากดาวเทียม GPS ทั้ง 2 ความถี่ คือ L1 เท่ากับ 1575.42 MHz และ L2 เท่ากับ 1227.12 MHz ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GPS (Novatel's Model 502GPSAntenna)

3.1.2.2 เครื่องรับสัญญาณ GPS

เป็นเครื่องรับที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ตั้งแต่ 4 ดวงขึ้นไปพร้อมๆ กัน และสามารถแสดงผลค่าตำแหน่งและความเร็วได้ทันที นอกจากนี้ข้อดีที่ใช้วัดตำแหน่งอย่างต่อเนื่องได้แล้ว เครื่องรับชนิดนี้ยังสามารถช่วยขจัดปัญหา GDOP ซึ่งเป็นความผิดพลาดอันเนื่องจากการจับกลุ่มของดาวเทียมที่ใช้นำร่องได้อีกด้วย โดยเครื่องรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมมาประมวลผลได้ครั้งละ 12 ดวงพร้อมๆ กัน ถูกติดตั้งที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ภาพเครื่องรับสัญญาณ GPS

3.1.2.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล TEC

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลค่า TEC ซึ่งจะทำหน้าที่บันทึกค่าความแตกต่างของเวลาหน่วงของสัญญาณดาวเทียม GPS 2 ย่านความถี่คือ คือ L1 เท่ากับ 1575.42 MHz และ L2 เท่ากับ 1227.12 MHz และทำการประมวลผลค่า TEC ที่รับได้จากดาวเทียมแต่ละดวงทุกๆ 30 วินาที ของแต่ละวัน และทำการบันทึกค่าไว้ในรูปแบบไฟล์ .TEX ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลค่า TEC

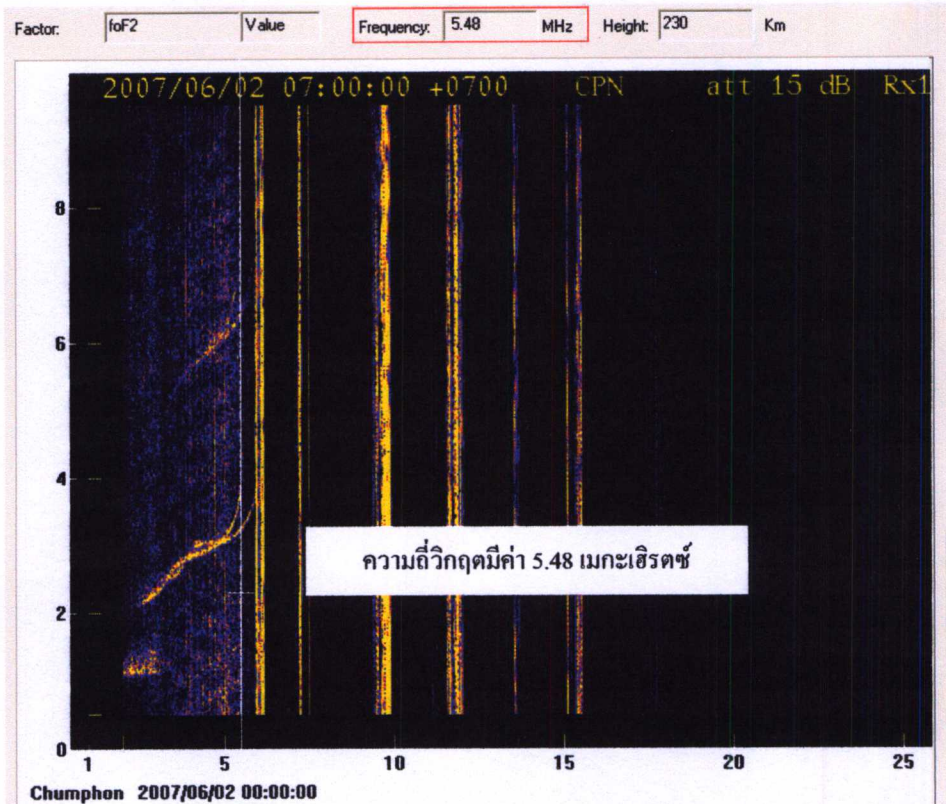
3.2 วิธีการเก็บผลและวิเคราะห์ข้อมูล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ อุปกรณ์ในการวิจัย 2 อุปกรณ์ในการวัดค่า f_oF2 และ ค่า TEC โดยใช้เทคนิคไอโอโนซอนด์ในการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ f_oF2 เพื่อนำไปคำนวณหาค่า ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (N_mF2) และใช้อุปกรณ์วัด TEC ในการประมวลผลค่า TEC เพื่อนำไปหาค่ากลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (τ) ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึง การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ f_oF2 จากไอโอโนแกรม และ ขั้นตอนการเก็บผล TEC

3.2.1 การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ f_oF2 จากไอโอโนแกรม

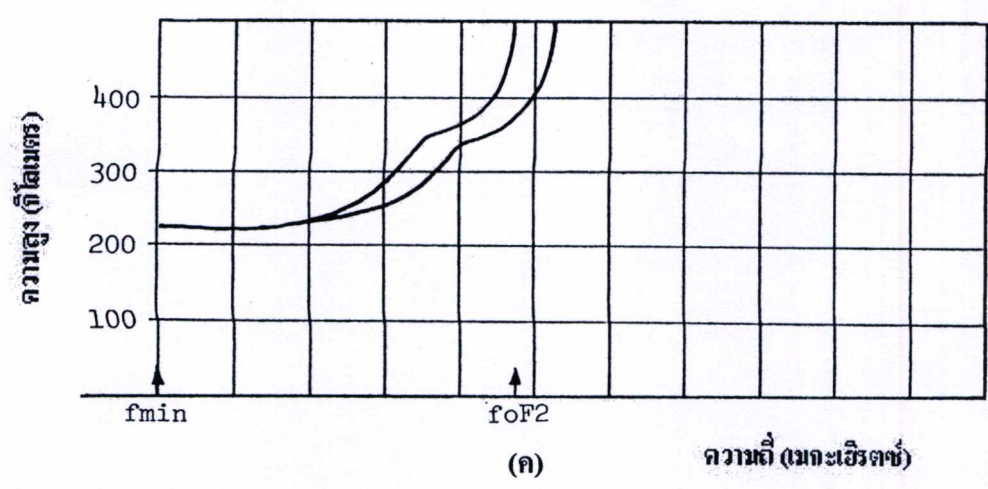
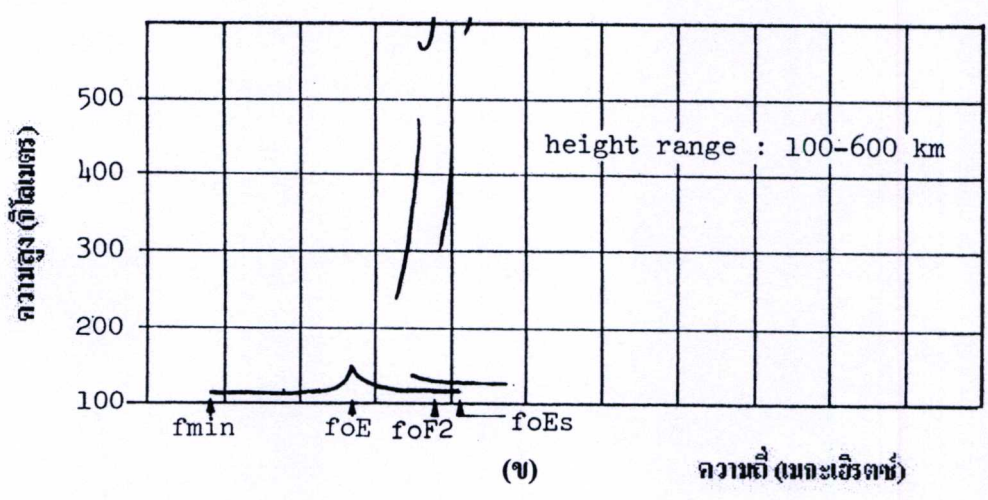
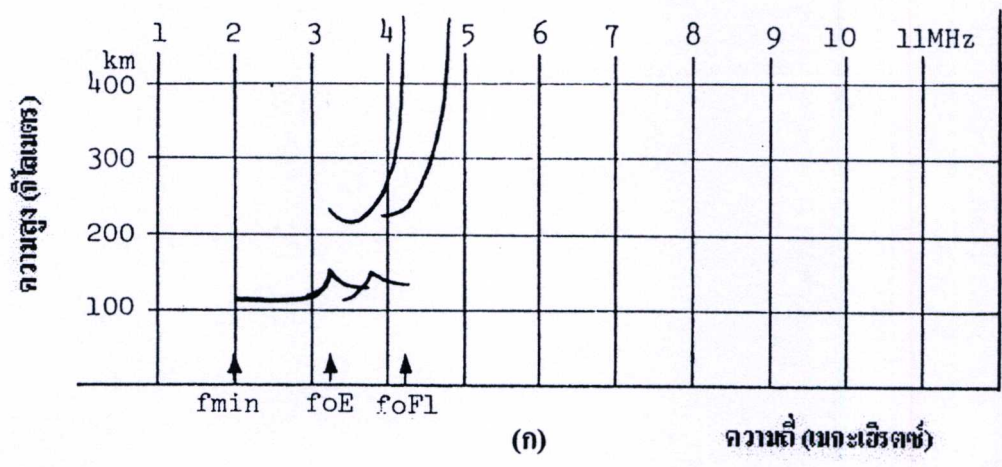
เทคนิคไอโอโนซอนด์ เป็นเทคนิคที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลง f_oF2 โดยทำการส่งคลื่นวิทยุที่มีพัลส์สั้นในแนวตั้ง เครื่องมือในการทดลองนี้จะทำการส่งคลื่นแบบต่อเนื่อง ความถี่ค่าตั้งแต่ 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยจะทำการเพิ่มความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ใน 1 รอบจะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาที และทำการบันทึกข้อมูลเวลาหน่วงระหว่างการส่งและการรับทุกๆ 15 นาที เมื่อทราบค่าความเร็วในการแพร่กระจายคลื่นและระยะตำแหน่งที่คลื่นสะท้อนจะทำให้สามารถคำนวณค่าได้ โดยคอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลแล้วพล็อตผลที่ได้ออกมาเป็นรูปภาพที่เรียกว่า ไอโอโนแกรม

โดยที่ไอโอโนแกรมคือ ภาพที่ใช้แสดงการสะท้อนของความถี่ที่ทำการส่ง และรับผ่านชั้นบรรยากาศซึ่งได้จากเทคนิคไอโอโนซอนด์ แสดงในรูปที่ 3.7

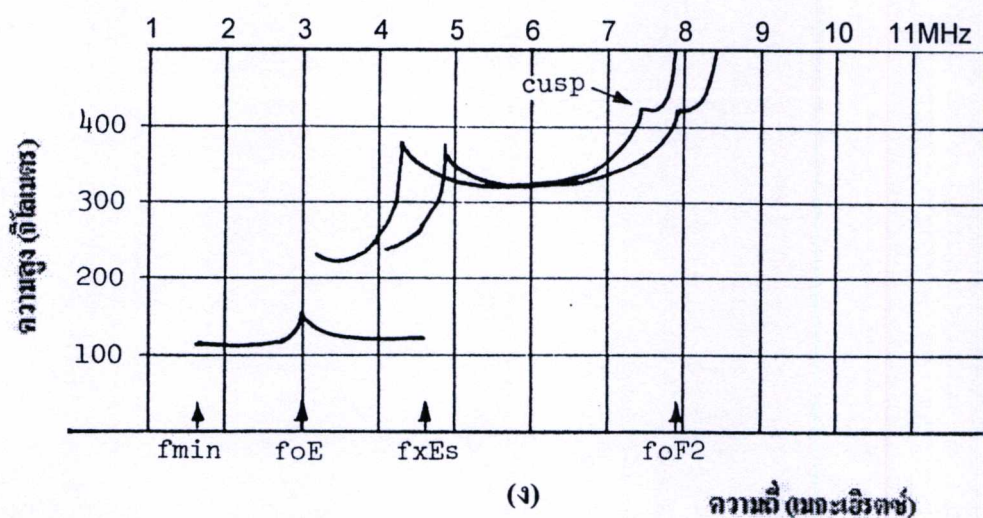


รูปที่ 3.7 การวัดค่า foF2 จากภาพไอโอโนแกรม โดยโปรแกรม Special scaling

จากรูปเป็นตัวอย่างการวัดค่า foF2 จากภาพไอโอโนแกรม โดยใช้โปรแกรม Special scaling ทำการวัดค่า foF2 ของวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2549 ณ เวลา 07.00 น. จากสถานีชุมพร โดย การวัดค่า foF2 จากโปรแกรม Special scaling สามารถทำได้โดยนำเส้นแกนตั้งไปสัมผัสกับส่วนโค้งแรกที่ตั้งฉากกับแนวแกนนอน ซึ่งเป็นแกนความถี่ มีหน่วยเป็น MHz ซึ่งจากรูปค่า foF2 ที่ทำการวัดได้มีค่า 5.48 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในทางสากลจะใช้สัญลักษณ์ foF2 โดยค่า foF2 นี้มีประโยชน์กับการนำไปใช้ในการสื่อสารทางวิทยุระยะไกล นอกจากนั้นแล้วยังมีความเกี่ยวข้องกับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ซึ่ง foF2 สามารถวัดได้จากส่วนโค้งแรกที่ตั้งฉากกับแกนนอนของไอโอโนแกรม ตัวอย่างของการพิจารณาค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ จากภาพไอโอโนแกรม ณ เวลาต่างๆที่ไม่สามารถพบได้บ่อยนักมีดังนี้

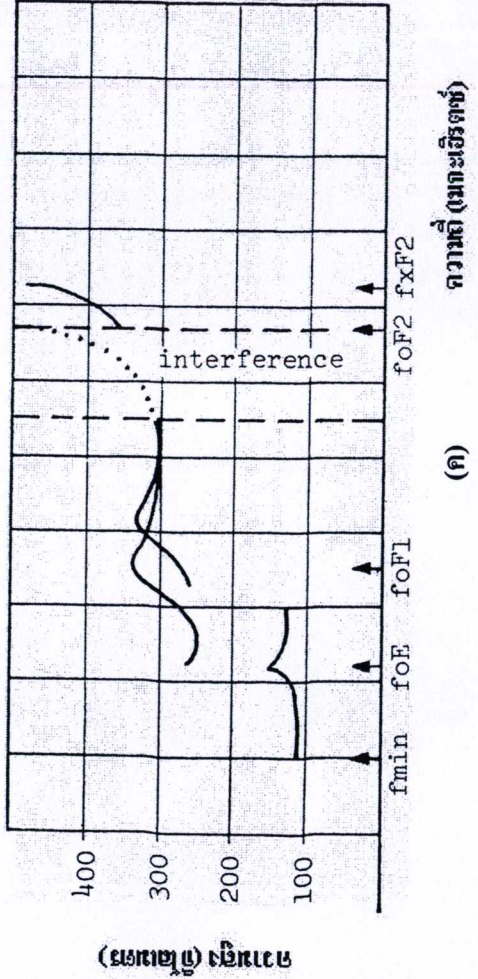
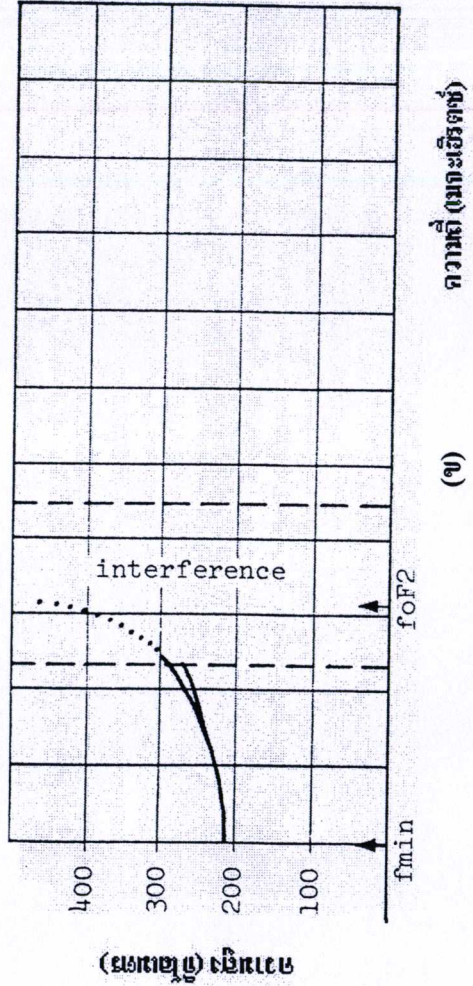
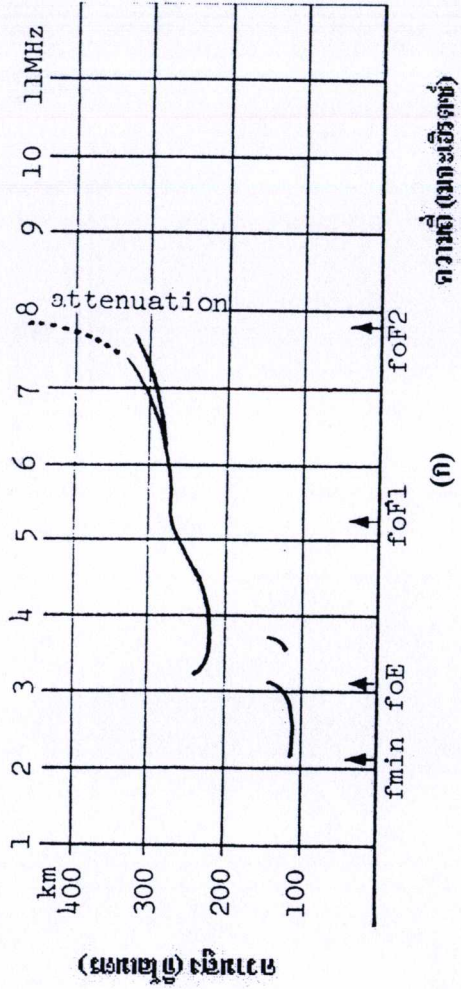


รูปที่ 3.8 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm) [26]

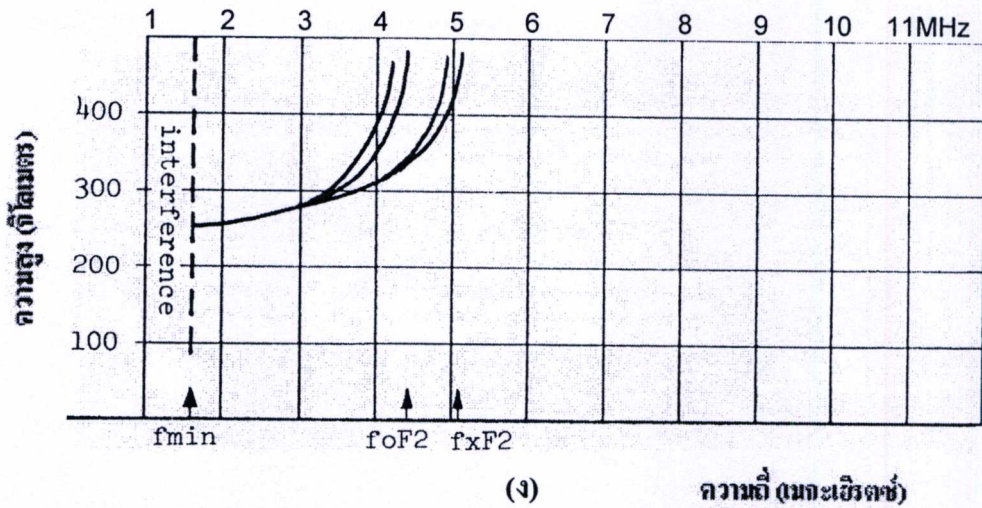


รูปที่ 3.8 (ต่อ)

ภาพไอโอโนแกรมจากรูปที่ 3.8 (ง) เป็นรูปที่ไม่ได้พบเห็นได้บ่อยนักในกรณีนี้เกิดจากความปั่นป่วนของไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric disturbances) ที่จะเกิดขึ้นในสภาวะที่เกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm) ซึ่งจะทำให้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น F2 มีค่าลดลงจนมีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น F1 หรืออาจจะลดลงจนมีค่าน้อยกว่าในชั้น F1 ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถหาได้จากไอโอโนแกรม จะใส่สัญลักษณ์ EG (E คือ มีค่าน้อย) โดยที่ค่า foF2 คือ 4.2 เมกะเฮิร์ตซ์ ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.8 (ข) จะเป็นภาพที่เกิดหลังจากรูปที่ 3.8 (ง) ได้เกิดไปแล้วความสูงของชั้น F₂ จะไม่สามารถหาค่าได้ ค่าความถี่วิกฤตของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในรูปนี้จะมีค่า 4.7 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนภาพถัดมานั้น รูปที่ 3.8 (ค) คือภาพไอโอโนแกรมที่เกิดในเวลากลางคืน ในกรณีนี้จะสามารถสังเกตค่าความสูงของชั้น F ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และค่าความถี่วิกฤตของชั้นได้อย่างชัดเจนโดยที่ค่า foF2 ในรูปนี้คือ 5.7 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนรูปที่ 3.8 (ง) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันรูปนี้จะมีความคิดปกติ คือ มีรอยหยัก (Cusp) เกิดขึ้นใกล้กับค่าความถี่วิกฤตเล็กน้อยแต่ไม่เป็นผลกระทบอะไรค่า foF2 ในรูปนี้จะมีค่า 7.9 เมกะเฮิร์ตซ์

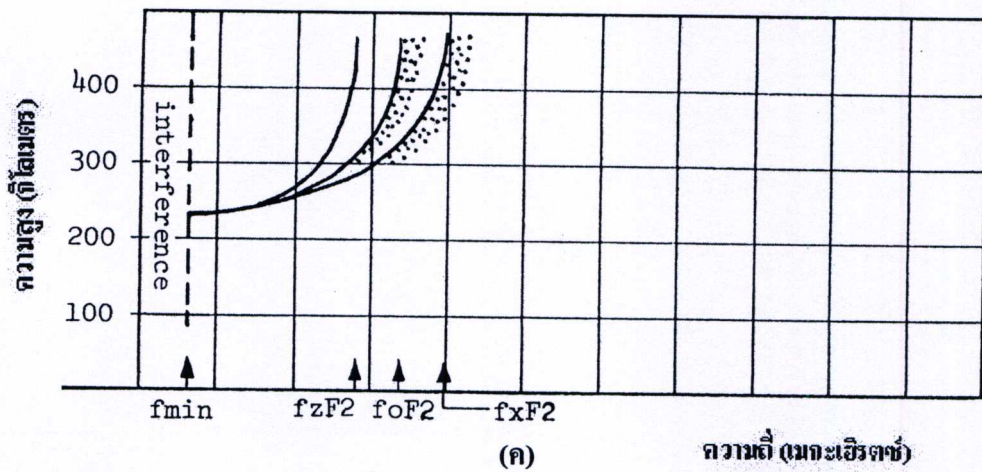
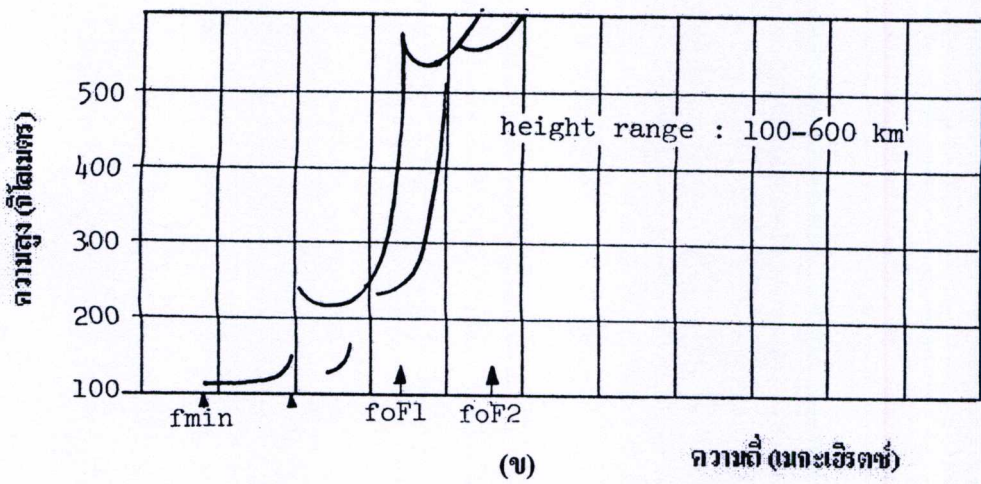
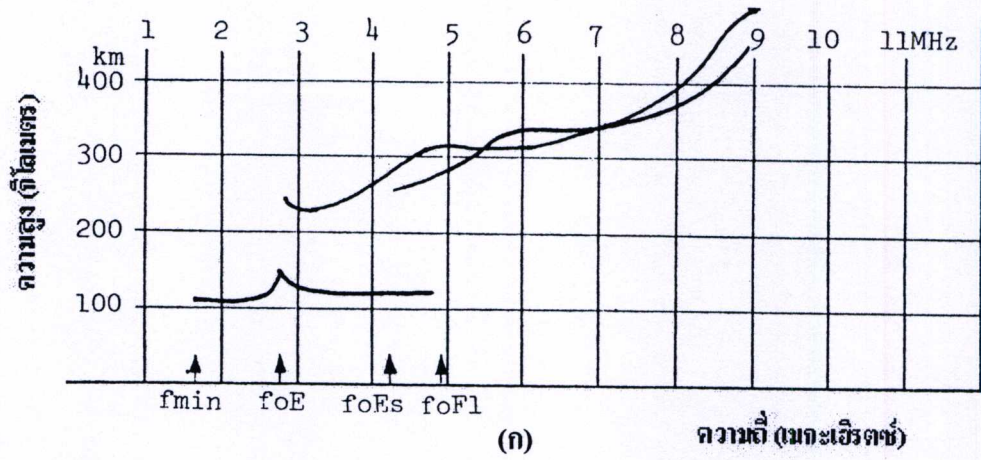


รูปที่ 3.9 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อเกิดการลดทอน และการแทรกสอด [26]



รูปที่ 3.9 (ต่อ)

รูปที่ 3.9 (ก) ภาพไอโอโนแกรมจะทำให้อ่านค่า f_oF2 เกิดความคลาดเคลื่อนไปบ้าง เนื่องจากเกิดการลดทอนของสัญญาณที่กลับเข้ามาที่เครื่องรับจึงไม่สามารถเห็นได้หมดโดยค่า f_oF2 ในรูปนี้คือ 7.8 R เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ใส่สัญลักษณ์ R ไว้ด้วย คือ สัญญาณเกิดการลดทอน รูปถัดมาคือรูปที่ 3.9 (ข) ในรูปนี้ก็เช่นกันจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการในการอ่านค่าความถี่วิกฤต ในรูปนี้เกิดจากการแทรกสอดของสัญญาณภายนอกที่เครื่องรับสามารถรับเข้ามาได้ด้วย ซึ่งเหตุการณ์ดังเช่นในภาพนี้จะเกิดขึ้นในเวลากลางคืน การพิจารณาค่า f_oF2 ทำได้โดยดูจากค่าความถี่วิกฤตที่ต่ำที่สุดก่อนที่จะเกิดการแทรกสอดของสัญญาณ คือ 3.3 เมกะเฮิร์ตซ์จนถึงรอยที่เส้นโค้งนั้นจะหายไปคือ 4.1 เมกะเฮิร์ตซ์ ถ้าระยะห่างระหว่าง 2 ค่านี้ไม่เกิน 20% ของค่าความถี่ที่สูงที่สุดคือ 4.1 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่า f_oF2 ที่อ่านได้คือ 3.3 DS เมกะเฮิร์ตซ์ (สัญลักษณ์ D คือเกิดความคลาดเคลื่อน และ สัญลักษณ์ S คือเกิดการแทรกสอดของสัญญาณ) ถ้าค่าความต่างของ 2 ค่าความถี่ที่ได้กล่าวมานั้นเกิน 20% ของค่าความถี่ที่สูงที่สุดจะไม่สามารถอ่านค่า f_oF2 ได้ โดยจะใส่สัญลักษณ์ S ไว้ คืออ่านค่าไม่ได้ เนื่องจากเกิดการแทรกสอดของสัญญาณ รูปที่ 3.9 (ค) เกิดการแทรกสอดของสัญญาณทำให้ค่า f_oF2 ไม่ชัดเจน สังเกตได้จากช่วงความถี่ 6.5 – 7.7 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเกิดการแทรกสอดค่า f_oF2 ของรูปนี้คือ 7.7 JS เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนในรูปถัดมาคือ รูปที่ 3.9 (ง) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืนในรูปนี้ชั้น F ที่สังเกตได้จะมีรูปร่างเป็นง่าม (Fork) โดยที่ความถี่จะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นความถี่สามัญ (Ordinary) และ ความถี่วิสามัญ (Extraordinary) ช่วงที่มีความถี่สูงกว่ามีความถี่เป็น 4.4 และ 5.1 เมกะเฮิร์ตซ์ตามลำดับ และช่วงที่มีความถี่ต่ำกว่ามีค่า 4.2 และ 4.8 เมกะเฮิร์ตซ์ คู่ที่มีความถี่สูงกว่าคือส่วนที่จะทำการอ่านค่าโดยจะใส่สัญลักษณ์ V เป็นตัวบอกว่ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีรูปร่างเป็นง่ามและเกิด 2 ช่วงความถี่ในไอโอโนแกรมโดยค่าความถี่วิกฤตในรูปนี้ก็คือ 4.4 V เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.10 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมเมื่อคลื่นมีการสะท้อนที่ผิดไปจากปกติ [26]

จากภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.10 (ก) ความถี่วิกฤตในรูปนี้จะมีค่าสูงแต่รูปร่างของเส้นโค้งของไอโอโนแกรมจะมีความผิดปกติที่บริเวณความถี่ประมาณ 9 เมกะเฮิร์ตซ์ ถ้าความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการสะท้อนจากแนวเฉียง (Oblique) ไม่ได้เกิดการสะท้อนในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นโลก ในบางเวลาอาจทำให้ค่าความถี่วิกฤตที่ทำการวัดแบบเทคนิคไอโอโนซอนเด้นั้นหายไปหรืออาจจะพบได้ แต่ค่านั้นจะไม่นำมาอ่านเป็นค่า f_oF2 ที่เวลานั้นเนื่องจากไม่ใช่ค่าที่เกิดจากการสะท้อนในแนวตรง แต่ในภาพไอโอโนแกรมนี้สามารถอ่านค่าความถี่วิกฤตได้คือ 9.0 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนในรูปถัดมาภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.10 (ข) คือเกิดเหตุการณ์ผิดปกติขึ้นอีกเมื่อความสูงของชั้น F2 มีค่าความสูงจากพื้นดินถึง 540 กิโลเมตร แต่การอ่านค่า f_oF2 จากรูปนี้ไม่มีผลกระทบอะไรมากนักกับเหตุการณ์นี้โดยค่า f_oF2 ในรูปนี้จะมีค่า 5.6 U เมกะเฮิร์ตซ์ โดยที่สัญลักษณ์ U คือเครื่องหมายที่บอกว่าขอบเขตความสูงของชั้น F2 นั้นมีค่ามากกว่าปกติ ในภาพ 3.10 (ก) , และ (ข) ล้วนแต่เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวัน ส่วนในรูปที่ 3.10 (ค) ภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางคืน ซึ่งในภาพนี้จะมีการเกิด สเปคตรัม เกิดขึ้น โดยในภาพนี้จะมีค่าความถี่ที่เกิดขึ้นพร้อมกัน 3 ความถี่ คือจะมีความถี่แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ (Magneto-electronic) (z mode) เพิ่มเข้ามาซึ่งโดยปกติแล้วจะพบแค่ 2 ความถี่คือ ความถี่สามัญ และ ความถี่วิสามัญ โดยที่ความถี่แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์ จากภาพไอโอโนแกรมนี้มีค่าความถี่ 3.8 เมกะเฮิร์ตซ์ และจะเกิด สเปคตรัม ในความถี่สามัญ และ ความถี่วิสามัญ ค่า f_oF2 ในรูปนี้คือ 4.4 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยจะสังเกตได้ว่าจะมีค่าอยู่ระหว่างค่าความถี่วิสามัญ กับ ความถี่แมกนีโตอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลค่า f_oF2 จากภาพไอโอโนแกรมแล้ว ข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Special scaling จะทำการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบไฟล์ .txt จากนั้นจะนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4

3.2.2 ขั้นตอนการเก็บผล TEC

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการในการเก็บผลค่า TEC โดยเริ่มต้นจากเมื่อเครื่องรับสัญญาณ GPS รับค่าผลต่างการประวิงของสัญญาณจีพีเอส 2 ย่านความถี่คือ f1 เท่ากับ 1575.42 MHz และ f2 เท่ากับ 1227.12 MHz และส่งมายังคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล TEC ซึ่งในส่วนนี้จะมีโปรแกรมที่ใช้คำนวณค่า TEC ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ติดมากับเครื่อง TEC JAVAD Meter ได้ข้อมูลเป็นไฟล์ .xt ในขั้นตอนต่อไปคือทำการเขียนโปรแกรมโดยใช้ VBA ซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม excel เพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่า TEC จากดาวเทียมที่เรารับได้ทุกๆ 30 วินาทีในแต่ละวัน เมื่อเราได้ข้อมูล TEC ทุกๆ 30 วินาทีในแต่ละวันในขั้นตอนต่อไปทำการเก็บผล TEC ทุกๆ 15 นาที ในแต่ละวัน โดยใช้โปรแกรมมาโครด้วยเช่นกัน ซึ่งทำการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 3 ปี คือ ปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2549 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปทำการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และแบบรายปี และนำไปคำนวณหาค่ากลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะกล่าวต่อไปใน บทที่ 4

บทที่ 4

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ปริมาณอิเล็กตรอนรวม ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุด ของชั้น F2 และกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

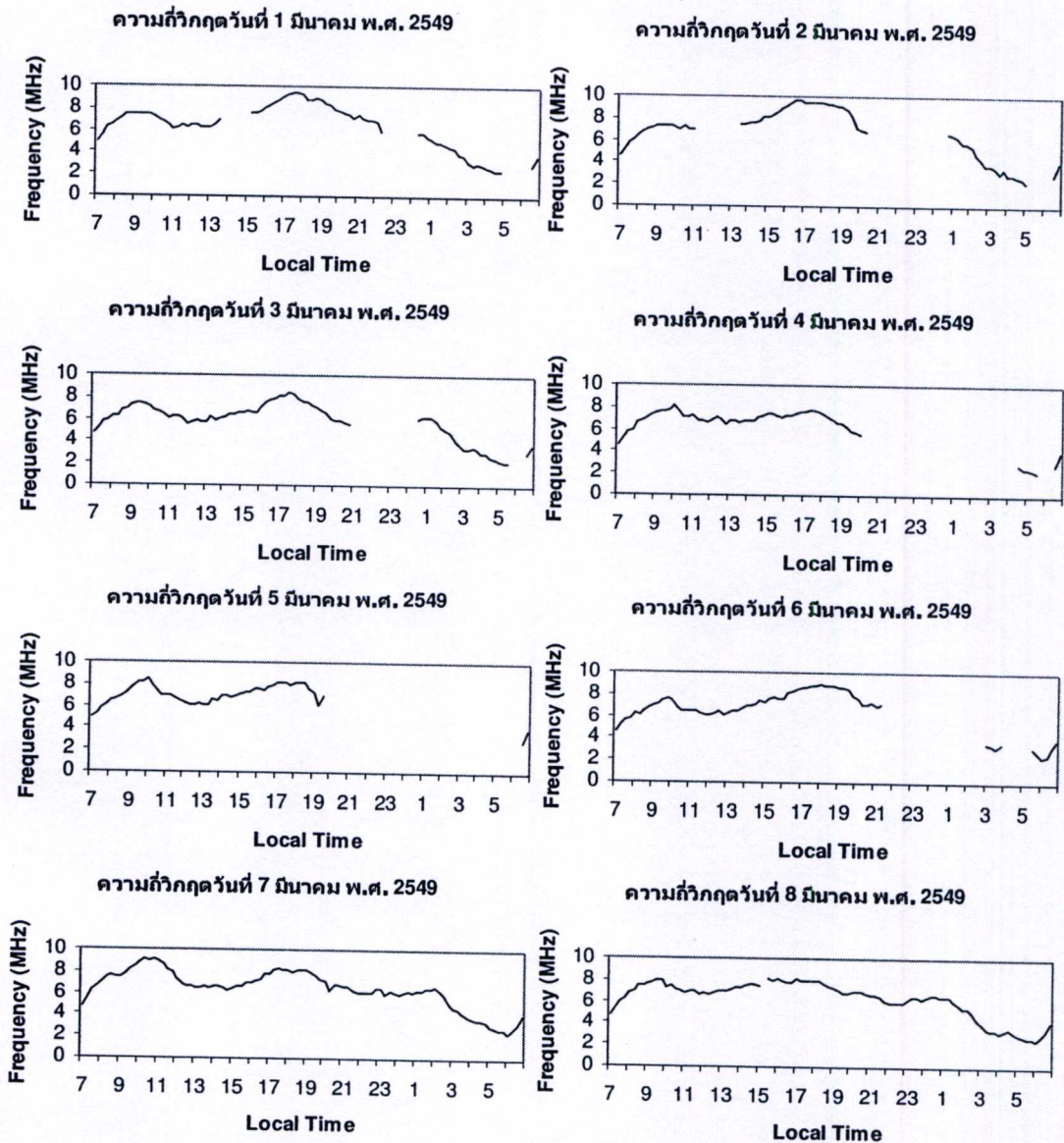
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีพารามิเตอร์จำนวน 4 ตัว คือ ความถี่วิกฤตของชั้น F2 (f_oF2) ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรม ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TEC) ที่ได้มาจากอุปกรณ์การวัด TEC ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ($NmF2$) และ กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (τ) ที่ได้มาจากการคำนวณตามสูตรในบทที่ 2 ในส่วนของ ความถี่วิกฤตของชั้น F2 และ ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัว ตั้งอยู่ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ ซึ่งตั้งอยู่ในแถบละติจูดต่ำ (Low latitude) ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2549 เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้ แบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากผลการทดลองที่ได้ทำการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมทุกๆ 15 นาที และทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ไปจนถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 จากสถานีตรวจวัดที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน แบบรายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี สามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างวัน โดยได้นำตัวอย่างของวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 มาแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 แบบรายวัน แสดงดังรูปที่ 4.1

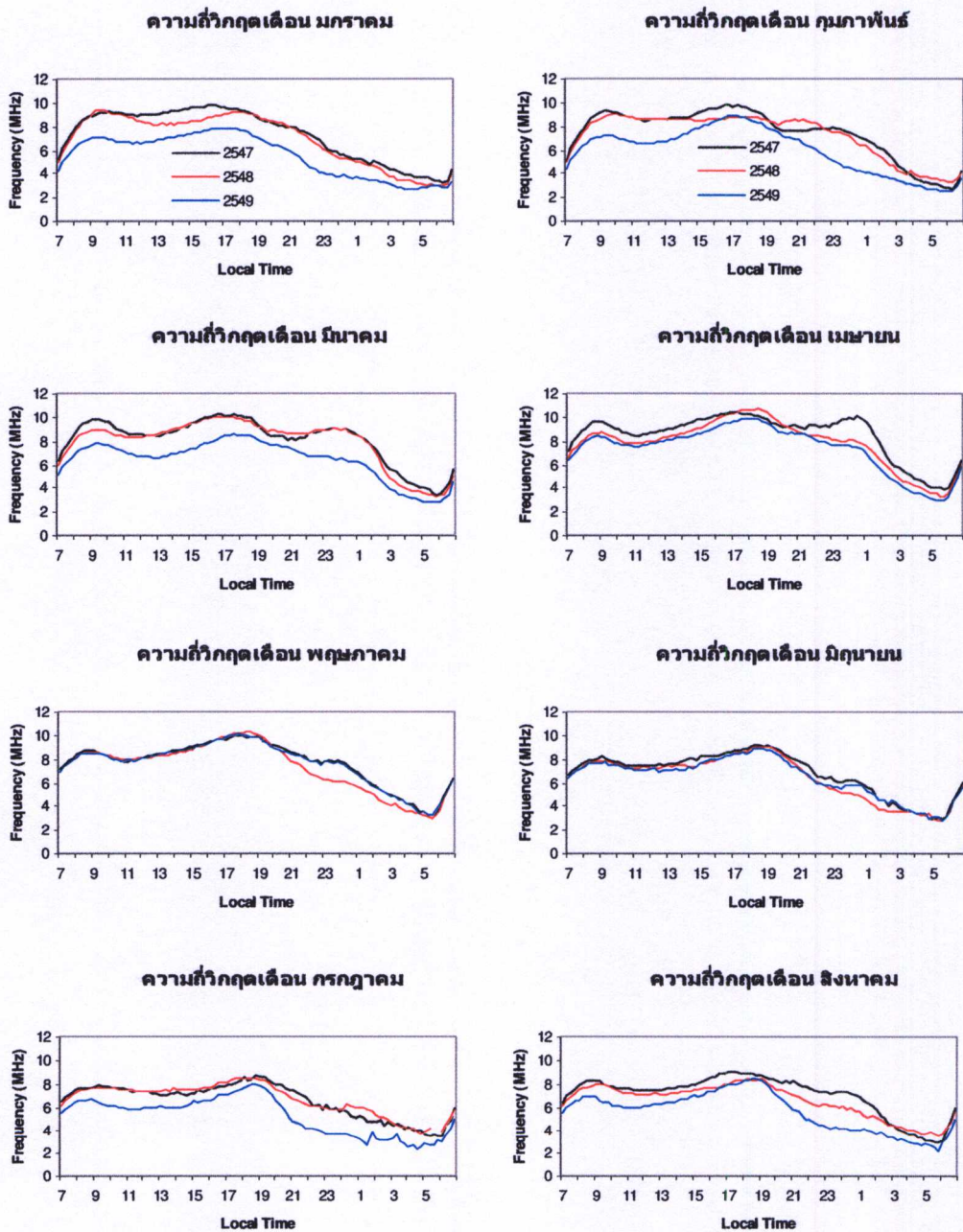


รูปที่ 4.1 ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549

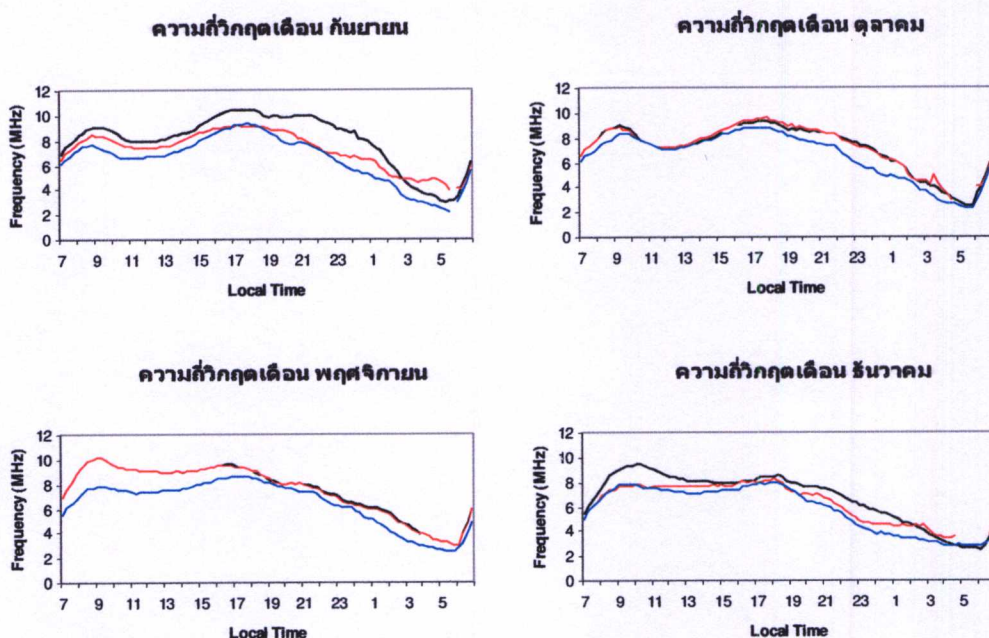
จากรูปที่ 4.1 ค่าที่นำมาแสดงในแต่ละกราฟนี้ได้มาจากการทำการวิเคราะห์ภาพ ไอโอโนแกรมที่ช่วงเวลาทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมงของแต่ละวันจะประกอบด้วยภาพไอโอโนแกรม 96 ภาพแล้วนำค่าทุกๆ 15 นาทีของแต่ละวันมาพล็อตเป็นกราฟ โดยข้อมูลที่นำมาแสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 แบบรายวันนี้เป็นข้อมูลเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น โดยจากรูปที่ 4.1 สังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในแต่ละวันที่นำมาแสดงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันคือ ความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น หรือในช่วงเวลา 06.00 น. จนถึงเวลาประมาณ 10.00 น. จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. และเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากพระอาทิตย์ตกความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าลดลงเรื่อยๆ ไปจนถึงเวลาประมาณ 05.00 น. และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้น สาเหตุที่ความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ สามารถอธิบายได้จากกลไกทางฟิสิกส์ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ กล่าวคือ เมื่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น จะทำให้เกิดกระบวนการไอโอไนเซชัน (หัวข้อ 2.1.2) ส่งผลให้ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นมีค่าสูงขึ้น ส่วนสาเหตุที่ความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าลดลงในช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 13.00 น. เนื่องมาจากมีการพัดพาอิเล็กตรอนไปในทิศทางอื่น (bite out) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในบริเวณสถานีที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของบริเวณดังกล่าวมีจำนวนลดลง ส่งผลให้ความถี่วิกฤตมีค่าลดต่ำลงด้วย และเมื่อการพัดพาอิเล็กตรอนถึงจุดอิมพัลส์ความถี่วิกฤตของชั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงก่อนพระอาทิตย์ตก หรือในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากพระอาทิตย์ตกชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะไม่ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ในชั้นจะเกิดการรวมตัวกลับ (Recombination) ของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้นที่มีการแตกตัว (ไอออไนซ์) ในตอนกลางวันเนื่องจากพลังงานจากแสงอาทิตย์ ส่งผลให้ความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าลดลง และจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีส่วนที่ขาดหายไปของกราฟนั้น เกิดจากการที่ไอโอโนแกรมไม่สามารถบันทึกภาพได้จึงทำให้ข้อมูลมีการขาดหายไปบางส่วน ส่วนสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้นั้นเกิดจากการที่มีสัญญาณภายนอกของคลื่นในย่าน HF แทรกสอดเข้ามาซึ่งจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าสัญญาณที่ต้องการแล้วบังคับช่วงของข้อมูลที่ต้องการอ่านค่าพารามิเตอร์ จึงทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์นั้นได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดปรากฏการณ์ สเปคโตรเฟ ในเวลากลางคืนก็จะเป็นการไม่สามารถหาความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ณ เวลานั้นได้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือนอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549

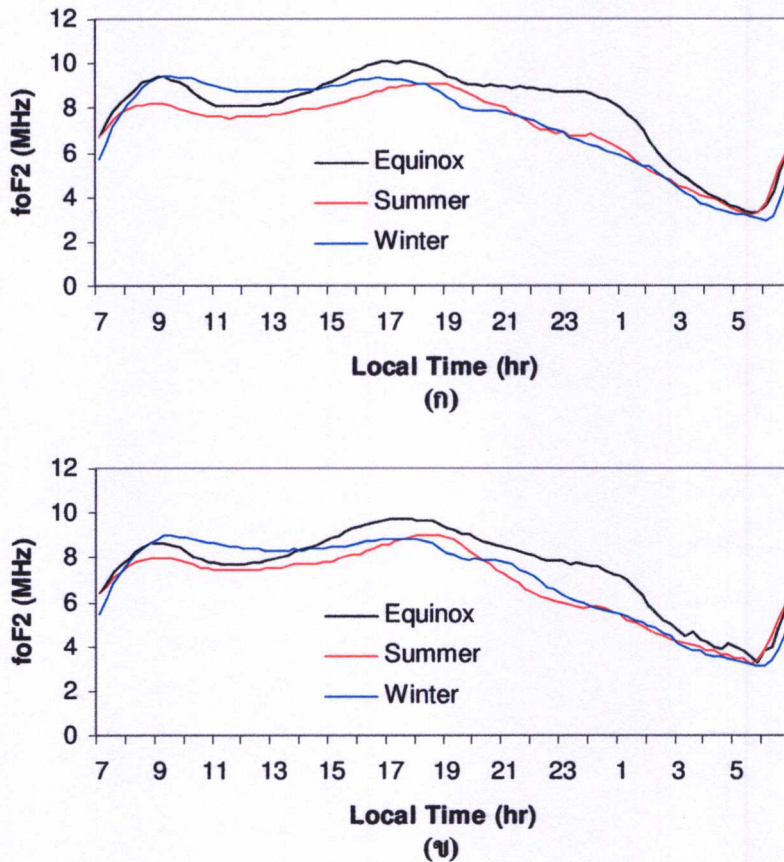


รูปที่ 4.2 (ต่อ)

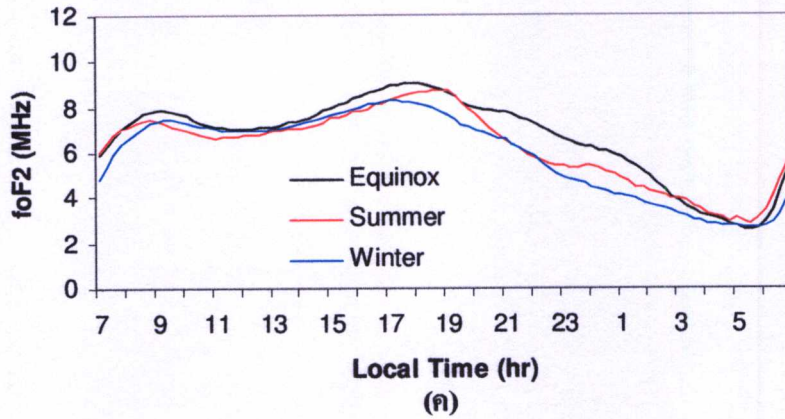
จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบความถี่วิกฤตของชั้น F2 แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549 โดยที่เส้น สีดำแทน ปี พ.ศ. 2547 สีแดงแทน ปี พ.ศ. 2548 และ สีน้ำเงินแทน ปี พ.ศ. 2549 กราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการนำความถี่วิกฤตของชั้น F2 แบบรายวันของแต่ละเดือนมาเฉลี่ย ณ เวลานั้นๆ ออกมาเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือน จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในแต่ละเดือนมีแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันกล่าวคือ ค่าความถี่จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 06.00 น.และจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากนั้นความถี่วิกฤต จะมีค่าลดลงจนถึงช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นหรือเวลาประมาณ 05.00 น. เมื่อพิจารณาแบบรายเดือนสังเกตได้ว่า ในเดือน มีนาคม เมษายน กันยายน และ ตุลาคม ของทั้ง 3 ปี ความถี่วิกฤตของชั้น F2 จะมีค่าสูงกว่าเดือนอื่น ซึ่งในช่วงเดือนนี้เป็นช่วงเดือน Equinox เป็นช่วงที่รังสีจากดวงอาทิตย์ ฉายตั้งฉากกับแนวเส้นศูนย์สูตรของโลก และอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรมากที่สุด ส่งผลให้อิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีการไอออไนเซชันสูงเป็นผลให้ความถี่วิกฤตมีค่าสูงกว่าเดือนอื่นๆ นอกจากนี้ความถี่วิกฤตจะแปรผันตามค่าปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ คือ ความถี่วิกฤตในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ เนื่องจากค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ของปี พ.ศ. 2547 มีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ

4.1.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาตามฤดูกาลออกเป็น 3 ฤดูกาลในแต่ละปีที่ทำการศึกษา คือ ช่วง Equinox (ช่วงเดือน มีนาคม , เมษายน , กันยายน , ตุลาคม) , Summer (ช่วงเดือน พฤษภาคม , มิถุนายน , กรกฎาคม , สิงหาคม) , และ Winter (พฤศจิกายน , ธันวาคม , มกราคม , กุมภาพันธ์) [1] แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549

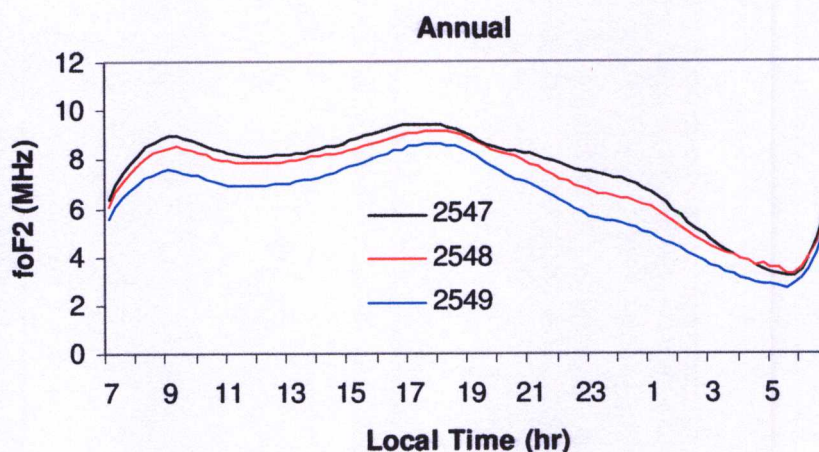


รูปที่ 4.3 (ต่อ)

รูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับพบว่าในรูปที่ 4.3 (ก) , (ข) และ (ค) มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันคือ ความถี่จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 06.00 น.และจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากนั้นความถี่วิกฤต จะมีค่าลดลงจนถึงช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นหรือเวลาประมาณ 05.00 น. เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลพบว่าความถี่วิกฤตในช่วงเวลา 17.00 น. ถึง 19.00 น. จะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูกาล Equinox และตามปกติหลังจากพระอาทิตย์ตกความถี่วิกฤตจะมีค่าลดลง แต่ในช่วงฤดูกาล Equinox ความถี่วิกฤตในช่วงเวลาประมาณ 22.00 น. ถึง 02.00 น. มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากในช่วงฤดูกาลนี้ จะเกิดความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มากกว่าในช่วงฤดูกาลอื่นๆ นั่นเอง ดังคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.2

4.1.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 โดยนำค่าเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละปีนำมาเฉลี่ยเป็นค่าเฉลี่ยแบบรายปี ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของทั้ง 3 ปีมีแนวโน้มคล้ายกันกับการเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตแบบรายวัน และ จะสังเกตเห็นว่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงสุดในทุกๆ ช่วงเวลา และค่อยๆ ลดต่ำลงในปี พ.ศ. 2548 จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2549 สาเหตุที่ค่าความถี่วิกฤตมีการเปลี่ยนแปลงลดต่ำลงเป็นผลมาจากปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในแต่ละปีมีค่าต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 จะแปรผันโดยตรงกับค่าปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ คือเมื่อปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่ามาก จะทำให้ค่าความถี่วิกฤต มีค่าสูง และ เมื่อปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าน้อย จะทำให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าต่ำ

ตารางที่ 4.1 ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 [29]

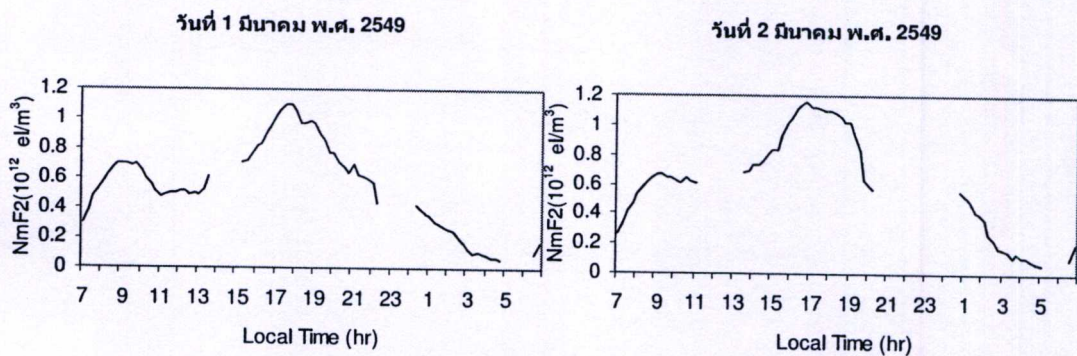
ปีที่ทำการศึกษา	พ.ศ. 2547	พ.ศ. 2548	พ.ศ. 2549
ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์	55	37	22

4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (NmF2)

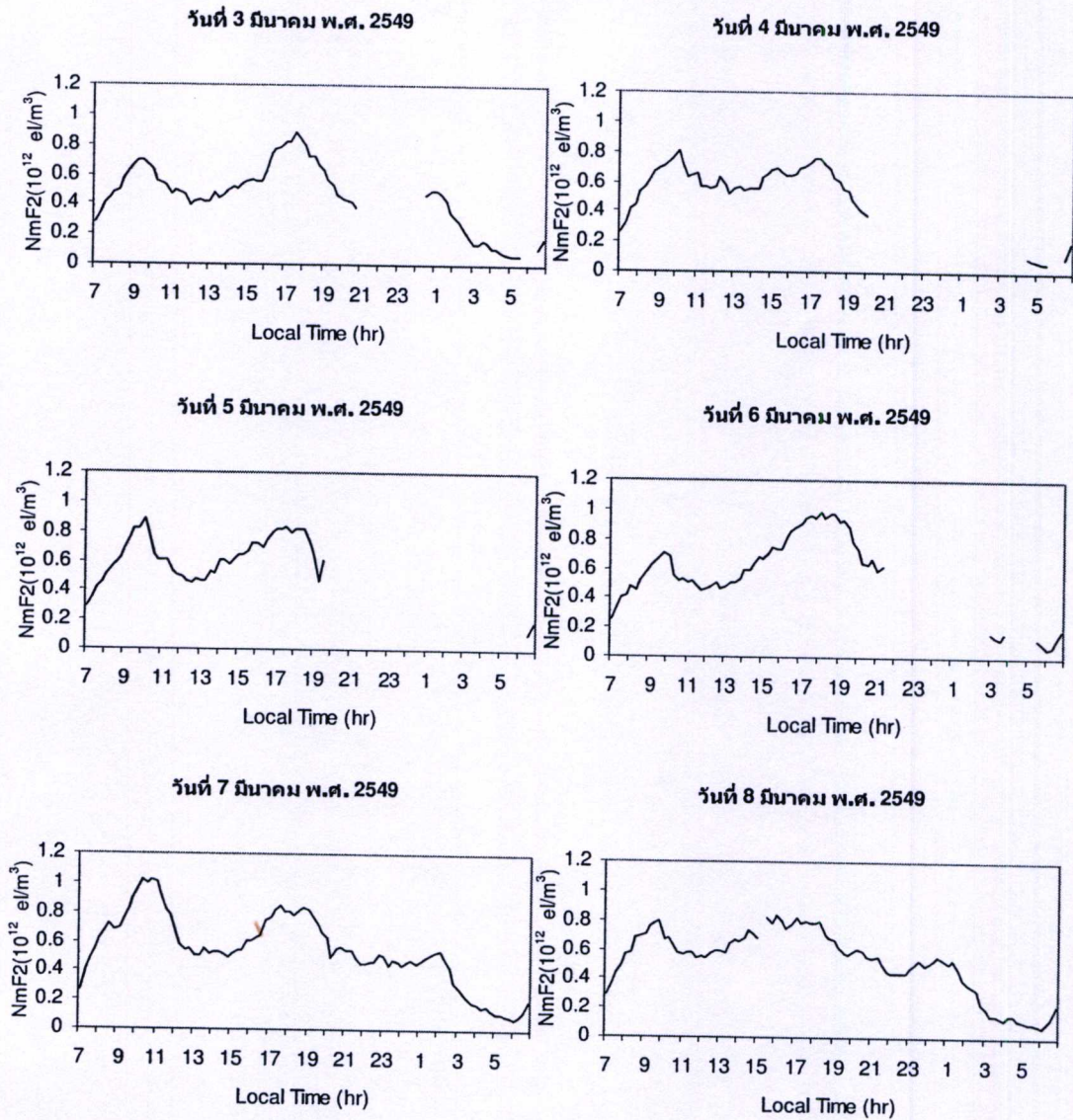
จากผลการทดลองที่ได้ทำการคำนวณความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองจากสมการ (2.13) ทุกๆ 15 นาที และทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ไปจนถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 จากสถานีตรวจวัดที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน แบบรายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี สามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (NmF2) แบบรายวัน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองในระหว่างวัน โดยได้นำตัวอย่างของวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 มาแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายวัน แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549



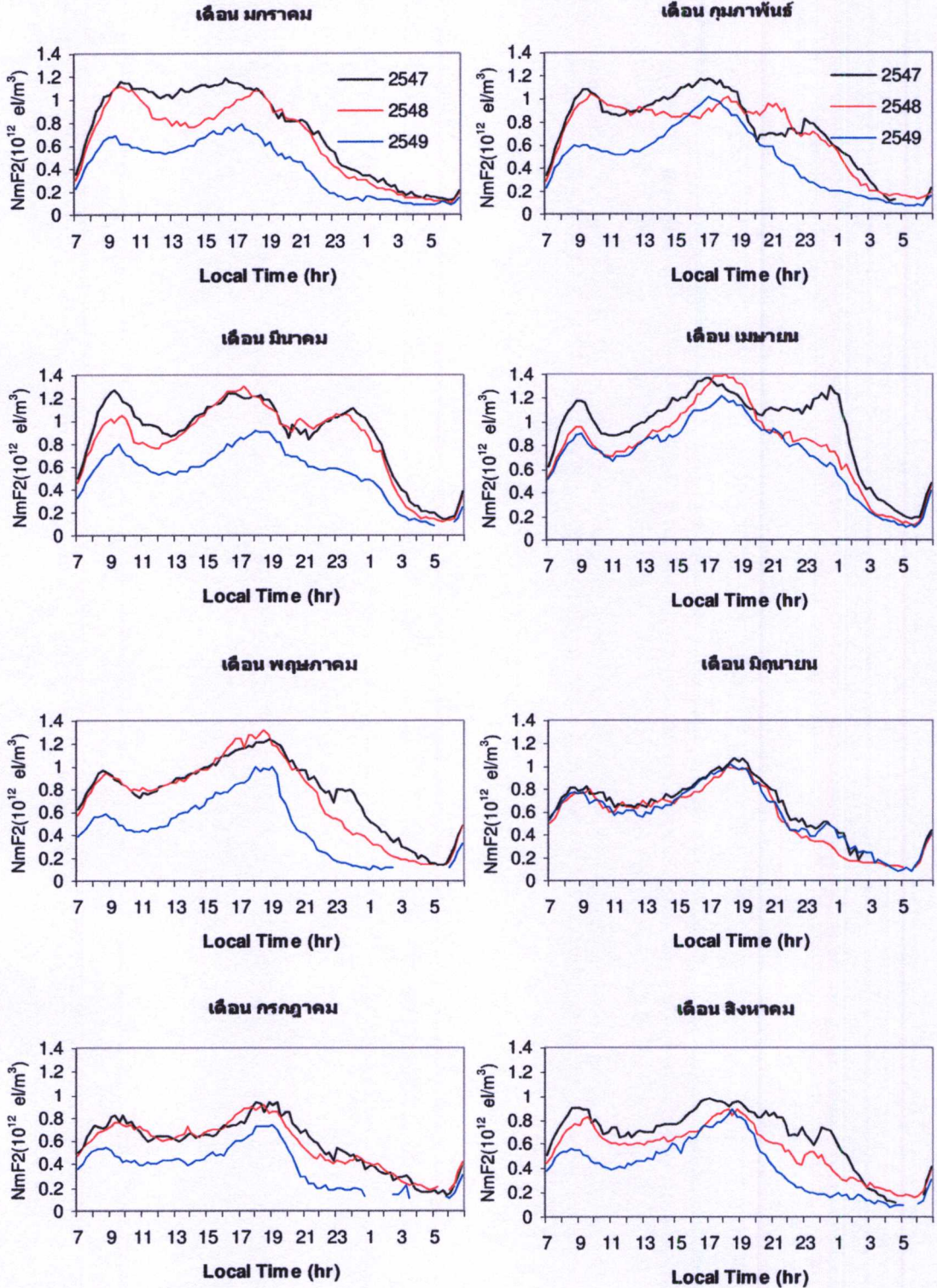
รูปที่ 4.5 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 แบบรายวัน ระหว่างวันที่ 1 ถึง 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 ซึ่งค่าที่นำมาแสดงในแต่ละกราฟนี้ได้มาจากการคำนวณ (2.13) โดยข้อมูลที่นำมาแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 แบบรายวันนี้เป็นข้อมูลเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น จากรูปที่ 4.5 จะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 จะแปรผันตามความถี่วิกฤตของชั้น F2 เนื่องจากมีความสัมพันธ์กันดังสมการ (2.13) ซึ่งผลในแต่ละวันที่นำมาแสดงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกัน คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น หรือในช่วงเวลา 06.00 น. จนถึงเวลาประมาณ 10.00 น. จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. และเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น.

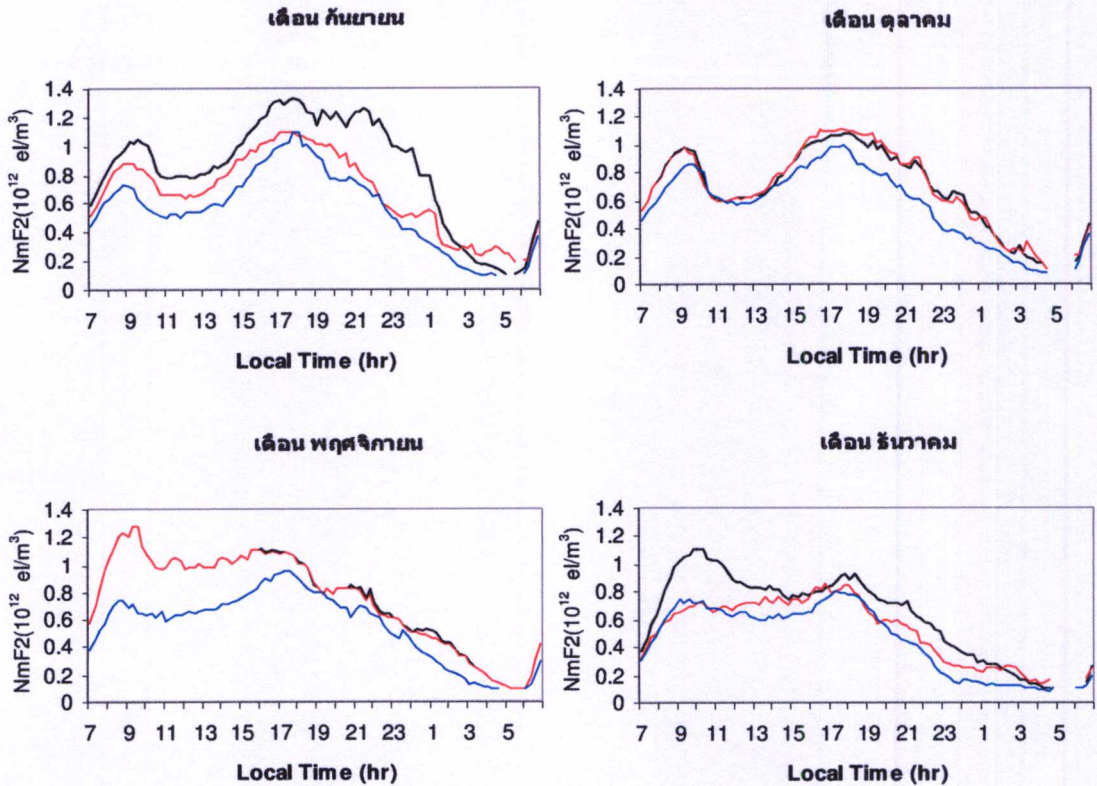
หลังจากพระอาทิตย์ตก ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ไปจนถึงเวลาประมาณ 05.00 น. และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้น สาเหตุที่ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 มีการเปลี่ยนแปลงเช่นนี้ สามารถอธิบายได้จากกลไกทางฟิสิกส์ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามคำอธิบาย (หัวข้อที่ 4.1.1) และจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีส่วนที่ขาดหายไปของกราฟนั้น เกิดจากการที่ไอโอโนแกรมไม่สามารถบันทึกภาพได้จึงทำให้ข้อมูลมีการขาดหายไปบางส่วน ส่วนสาเหตุที่ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ได้นั้นเกิดจากการที่มีสัญญาณภายนอกของคลื่นในย่าน HF แทรกสอดเข้ามาซึ่งจะมีความแรงของสัญญาณมากกว่าสัญญาณที่ต้องการแถมบังช่วงของข้อมูลที่ต้องการอ่านค่าพารามิเตอร์ จึงทำให้ไม่สามารถอ่านค่าพารามิเตอร์นั้นได้ นอกจากนี้เมื่อเกิดปรากฏการณ์ สเปิร์ดเอฟ ในเวลากลางคืนก็จะไม่สามารถหาค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จึงส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ได้เช่นกันเนื่องจากต้องอาศัยความสัมพันธ์ของความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในการคำนวณ ณ เวลานั้น

4.2.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (NmF2) แบบรายเดือน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองแบบรายเดือนอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายเดือน แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549



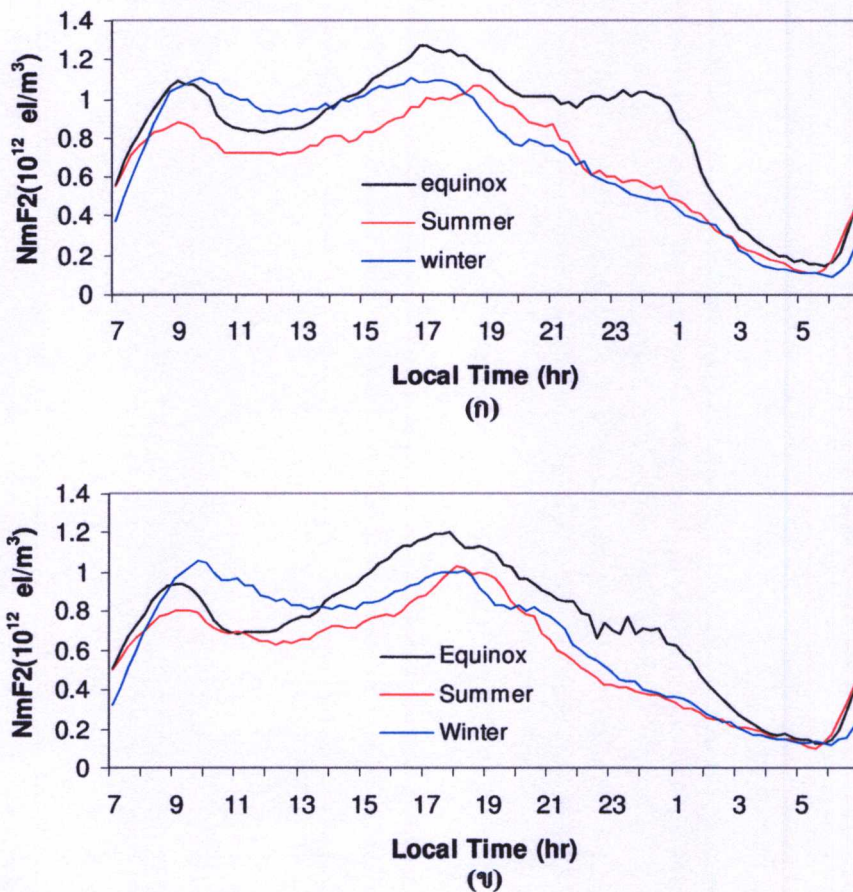
รูปที่ 4.6 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายเดือน ของแต่ละปี ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549 โดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจาก ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายวันของแต่ละเดือน นำมาหาค่ามัธยฐาน ณ เวลานั้นๆ ได้เป็นค่ามัธยฐานแบบรายเดือน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือน จากรูป จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง ในแต่ละเดือนมีแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันกล่าวคือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองจะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 06.00 น.และจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากนั้นความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง จะมีค่าลดลงจนถึงช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นหรือเวลาประมาณ 05.00 น. จากรูปพบว่าในช่วงเดือน มีนาคม เมษายน กันยายน และตุลาคม ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง จะมีค่าสูงกว่าเดือนอื่น ซึ่งในช่วงเดือนนี้เป็นช่วงเดือน Equinox (หัวข้อที่ 4.1.2) จึงส่งผลให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง มีค่าสูงกว่าเดือนอื่นๆ นอกจากนี้ NmF2 จะแปรผันตามค่าปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ คือ NmF2 ในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ เนื่องจากค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ของปี พ.ศ. 2547 มีค่าสูงกว่า

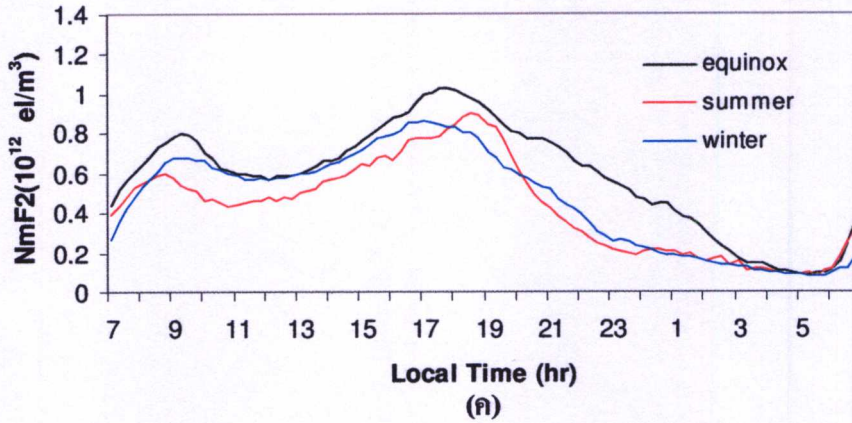
ปี พ.ศ. 2548 และปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ และจากกราฟจะเห็นได้ว่ามีข้อมูลในบางเดือนของช่วงเวลาที่ใกล้เข้าขาดหายไปเนื่องจาก NmF2 ในเดือนนั้นๆมีค่าต่ำมากและมีจำนวนข้อมูลประมาณ 2 ถึง 3 ค่า ใน 1 เดือน จึงไม่เหมาะที่จะนำมาหาค่ามัธยฐาน เพราะจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดเมื่อนำไปหาค่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

4.2.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (NmF2) ตามฤดูกาล

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง ตามฤดูกาล ในปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2549 โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาตามฤดูกาลออกเป็น 3 ฤดูกาลในแต่ละปีที่ทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง ตามฤดูกาล
(ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549

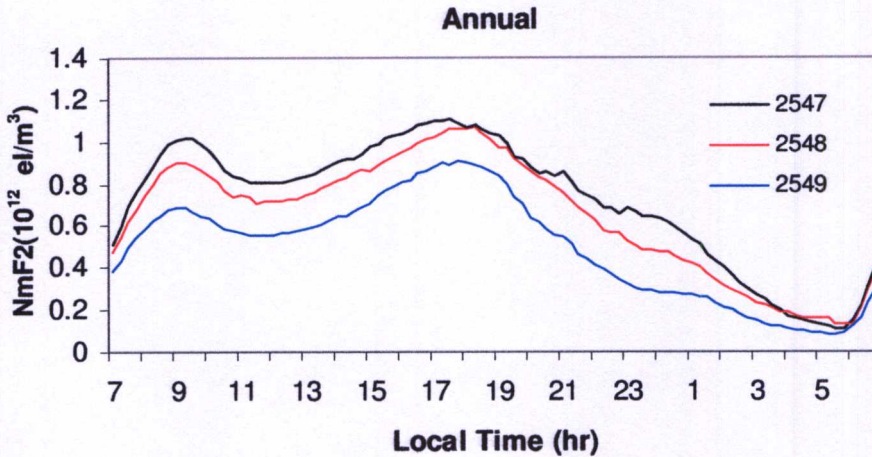


รูปที่ 4.7 (ต่อ)

รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับโดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการนำค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายวันของแต่ละเดือนในฤดูกาลนั้นๆ มาหาค่ามัธยฐาน ณ เวลาเดียวกัน ได้เป็นค่ามัธยฐานตามฤดูกาล เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดูกาล พบว่าในรูปที่ 4.7 (ก) , (ข) และ (ค) มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันคือ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 06.00 น. และจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากนั้น NmF2 จะมีค่าลดลงจนถึงช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นหรือเวลาประมาณ 05.00 น. เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลพบว่า NmF2 ในช่วงเวลา 17.00 น. ถึง 19.00 น. จะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูกาล Equinox และตามปกติหลังจากพระอาทิตย์ตก NmF2 จะมีค่าลดลง แต่ในช่วงฤดูกาล Equinox NmF2 ในช่วงเวลาประมาณ 22.00 น. ถึง 02.00 น. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากในช่วงฤดูกาลนี้ จะเกิดความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากกว่าในช่วงฤดูกาลอื่นๆ นั่นเอง โดยในปี พ.ศ. 2547 ความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาดังกล่าวของฤดูกาล Equinox จะมีค่าสูงกว่าในปีอื่นๆ ส่วนในปี พ.ศ. 2549 จะไม่ค่อยพบความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในช่วงเวลาดังกล่าวของฤดูกาล Equinox เนื่องจากในปี พ.ศ. 2549 เป็นปีที่มีจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ ทำให้เกิดความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.2.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 (NmF2) แบบรายปี

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองแบบรายปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองแบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549

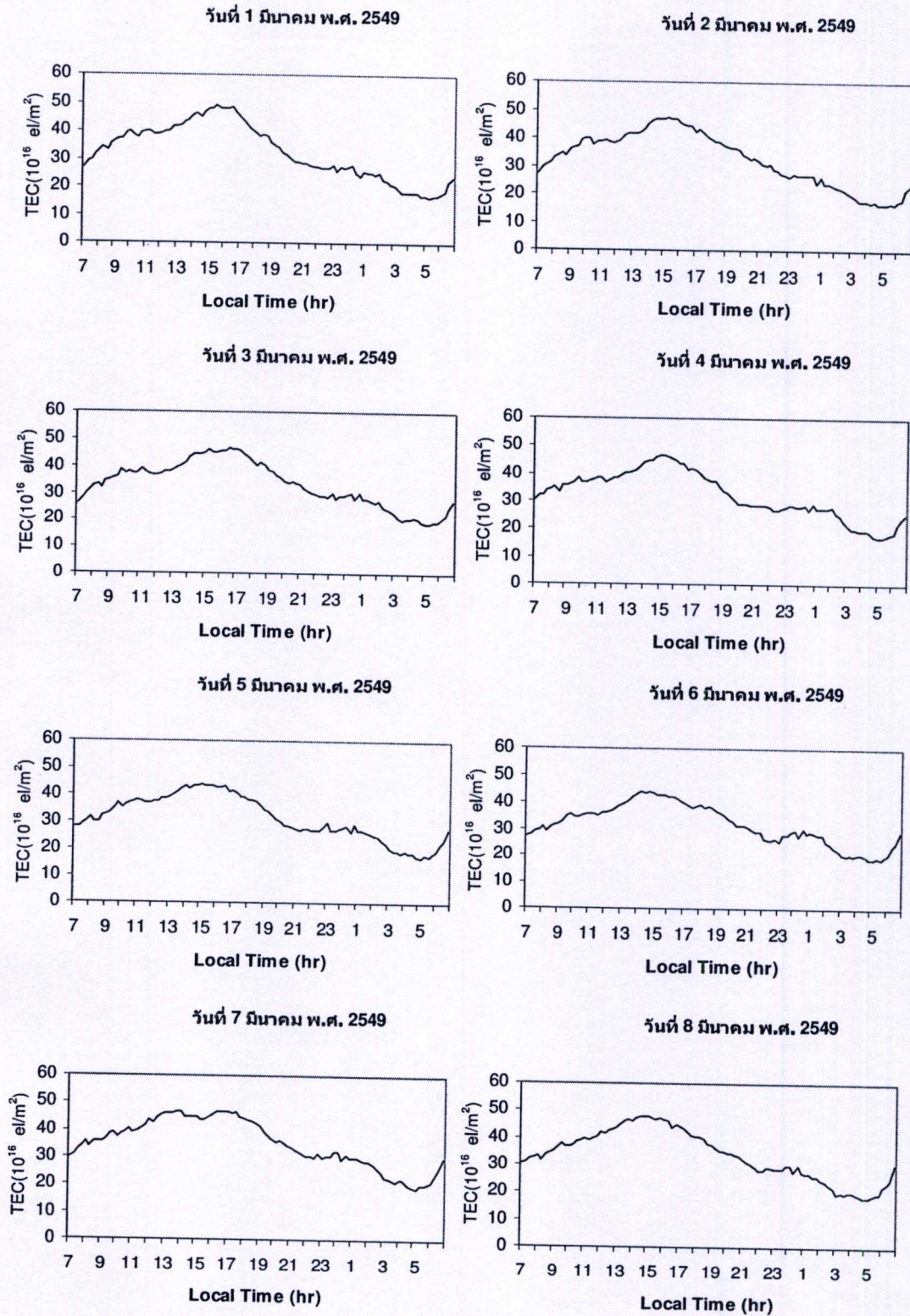
รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 โดยนำข้อมูลรายวันของแต่ละเดือนมาต่อเรียงกันทั้งปีแล้วทำการหาค่ามัธยฐาน ณ เวลาเดียวกัน ได้มาเป็นค่ามัธยฐานแบบรายปี ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองของทั้ง 3 ปีมีแนวโน้มคล้ายกันกับการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง แบบรายวัน และ จะสังเกตเห็นว่า NmF2 ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ในปี พ.ศ. 2548 จะมีค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองสูงกว่า ปี พ.ศ. 2549 ในทุกๆช่วงเวลา สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในแต่ละปีมีค่าต่างกัน ซึ่งพบว่า NmF2 จะแปรผันตามค่าปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ คือเมื่อปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่ามาก จะทำให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง มีค่าสูง และเมื่อจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าน้อย จะทำให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองมีค่าต่ำลงนั่นเอง

4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากผลการทดลองที่ได้ทำการเก็บค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมงของแต่ละวันและทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ไปจนถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 จากสถานีตรวจวัดที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน แบบรายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี สามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.3.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างวัน โดยได้นำตัวอย่างของวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 มาแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน แสดงดังรูปที่ 4.9

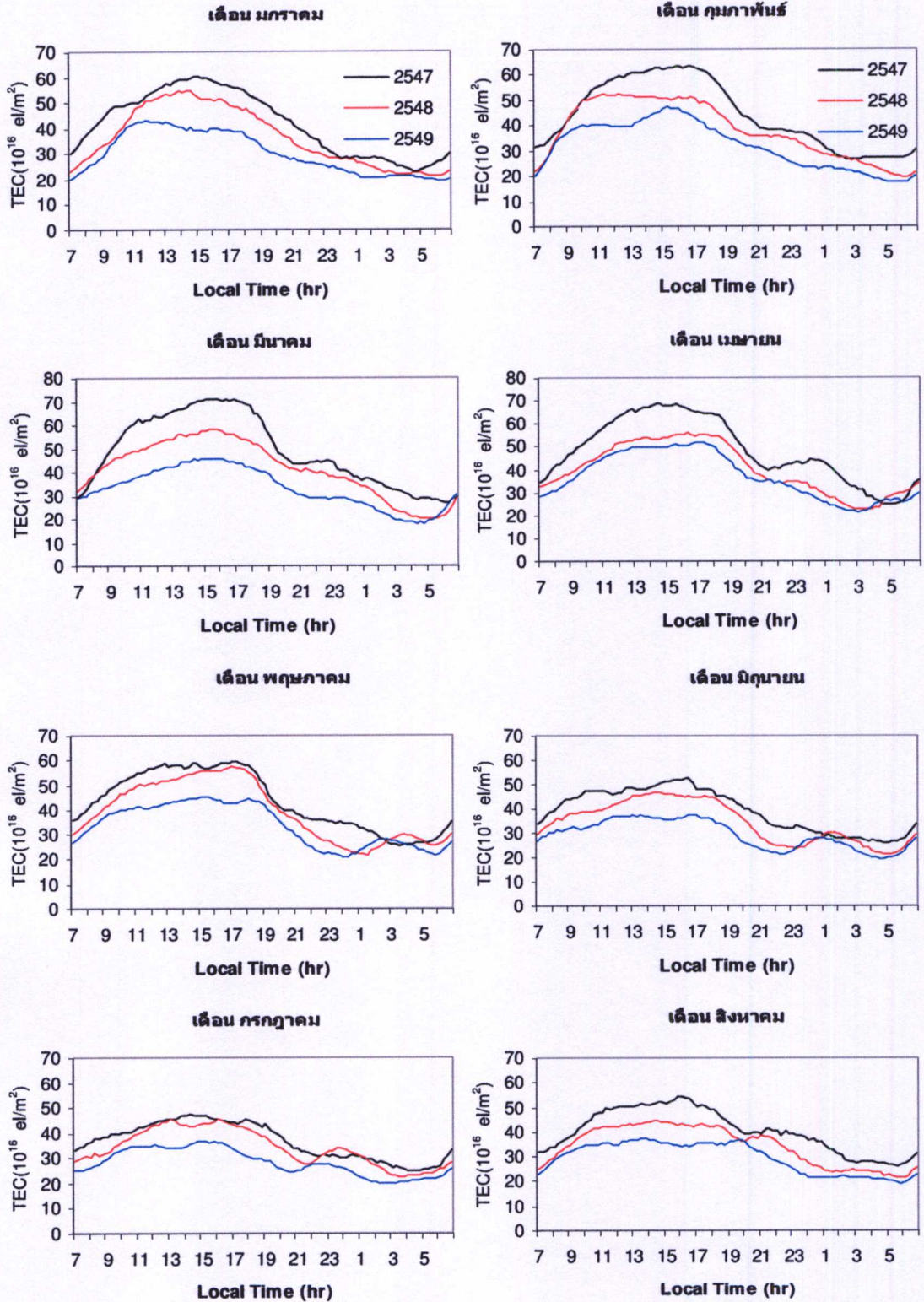


รูปที่ 4.9 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549

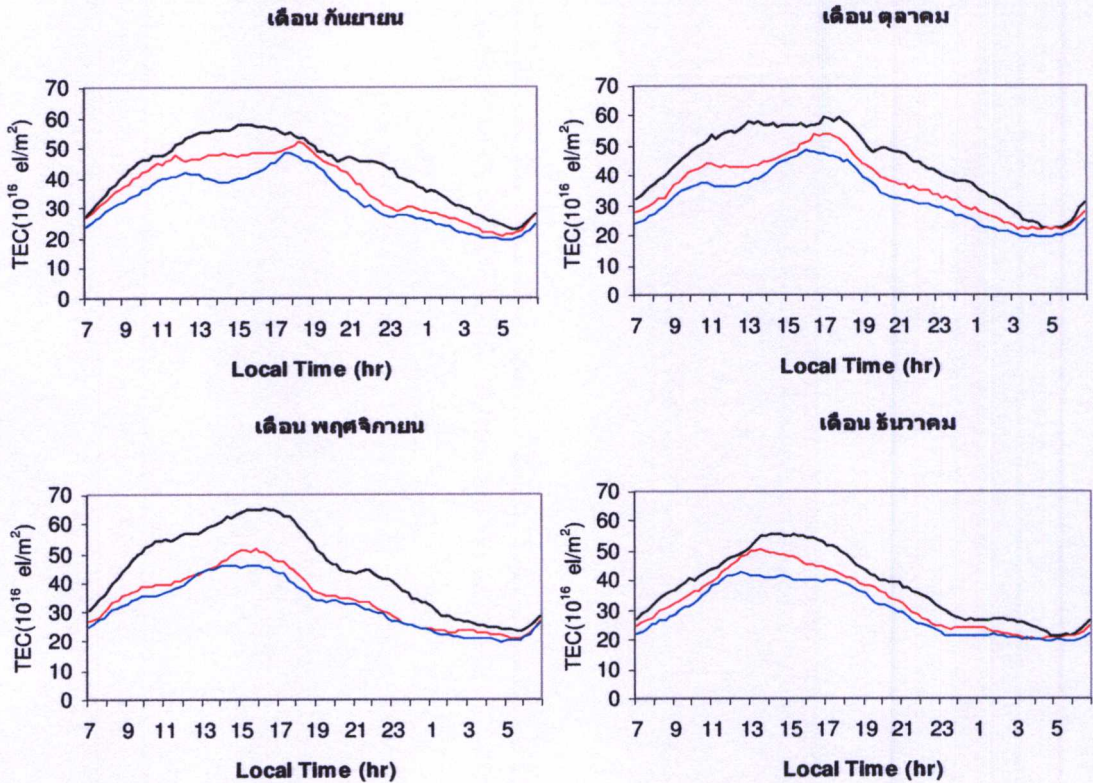
จากรูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลง ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน ระหว่างวันที่ 1 ถึง 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 ซึ่งค่าที่นำมาแสดงในแต่ละกราฟนี้ได้มาจากเครื่องรับสัญญาณ GPS นำค่าที่ได้รับมาใช้โปรแกรม VBA ในการคำนวณหา TEC ซึ่งได้ทำการเก็บ TEC ที่ช่วงเวลาทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมงของแต่ละวัน แล้วนำค่าทุกๆ 15 นาทีของแต่ละวันมาพล็อตเป็นกราฟ โดยข้อมูลที่นำมาแสดงการเปลี่ยนแปลง TEC แบบรายวันนี้เป็นข้อมูลเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม ในแต่ละวันนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันคือ TEC จะมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในเวลา 06.00 น. เมื่อเริ่มมีแสงอาทิตย์ที่เป็นพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้แก่ ความเข้มจากรังสี EUV และ X-ray จนเกิดการไอออไนซ์ ของออกซิเจน และ ไนโตรเจน ตามกลไกทางฟิสิกส์ของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 16.00 น. หลังจากนั้นเมื่อพระอาทิตย์ตกค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมจะมีค่าลดลงเรื่อยๆตั้งแต่เวลา 17.00 น. ถึง 05.00 น. เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนการไอออไนซ์ ของออกซิเจน และ ไนโตรเจน ตามกลไกทางฟิสิกส์ เกิดขึ้นน้อยและเริ่มลดลงจนจางหายไปในช่วงเวลากลางคืน

4.3.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือนอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549



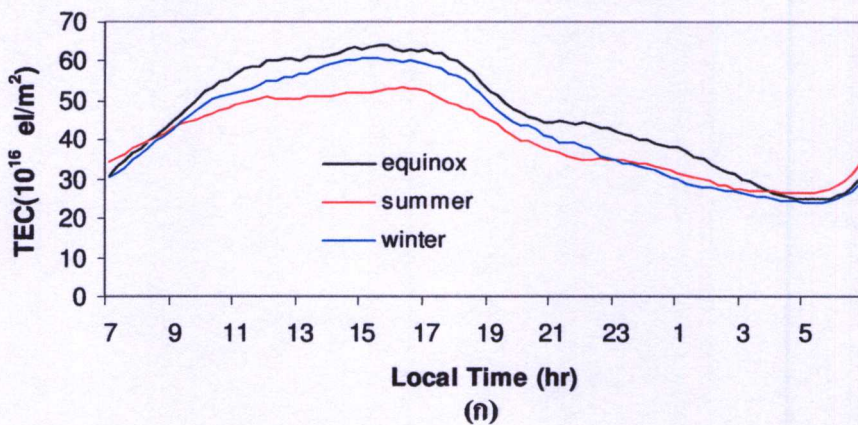
รูปที่ 4.10 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบ ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ของแต่ละปี ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549 โดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม แบบรายวันของแต่ละเดือนมาหาค่ามัธยฐาน ณ เวลานั้นๆ ได้มาเป็นค่า มัธยฐานแบบรายเดือน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือน จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวม ในแต่ละเดือนมีแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงแบบรายวันกล่าวคือ ปริมาณอิเล็กตรอนรวม จะมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในเวลา 06.00 น. จนมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 16.00 น. หลังจากนั้นเมื่อพระอาทิตย์ตก TEC จะมีค่าลดลงเรื่อยๆตั้งแต่เวลา 17.00 น. จนถึง 05.00 น. เมื่อทำการเปรียบเทียบ TEC แบบรายเดือนของปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะเห็นว่า TEC ในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ เนื่องจากค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ของปี พ.ศ. 2547 มีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมที่สูงที่สุดในเดือนมีนาคม โดยมีค่าอยู่ที่ 71.36 TECU และเดือน เมษายน มีค่าอยู่ที่ 69 TECU ซึ่งในเดือนนี้เป็นช่วง Equinox คือในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นมากที่สุดจนเป็นผลให้เกิดผลกระทบต่อการสื่อสารดาวเทียม แต่ความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอ

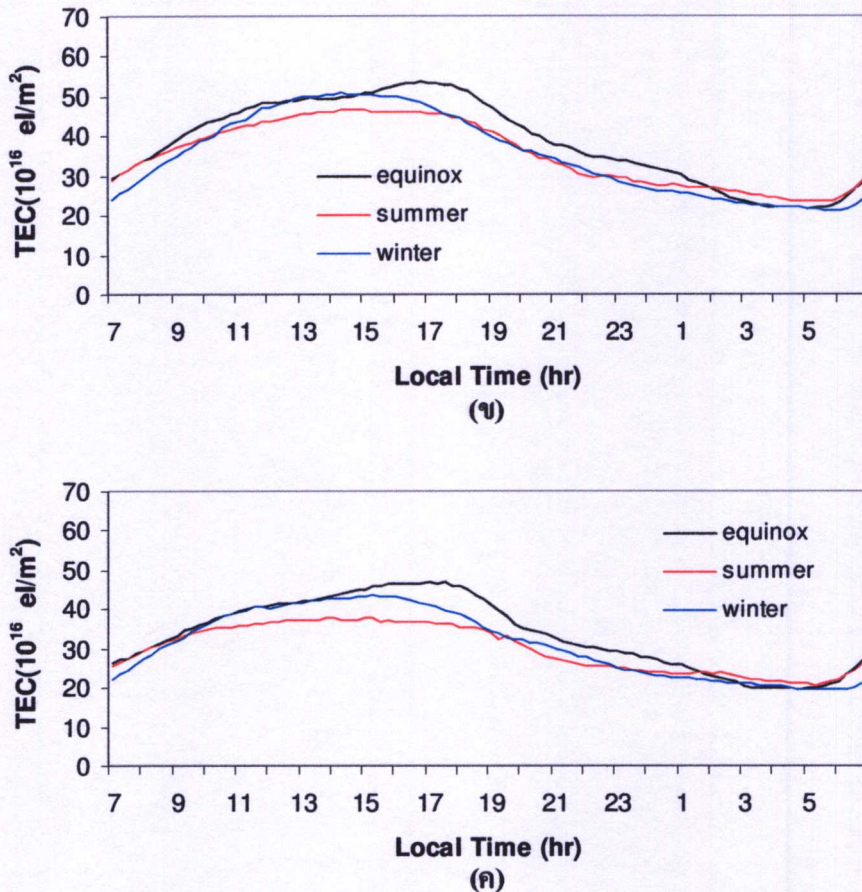
ไอโอโนสเฟียร์นั้นไม่ได้เกิดในเวลาที TEC มีค่าสูงสุดแต่จะเกิดในช่วงหลังดวงอาทิตย์ตกดินและไม่มีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนแต่เกิดการรวมตัวกลับภายในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในแถบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจะมีการไอออไนซ์สูงในช่วงเวลาหลังจากดวงอาทิตย์ขึ้น ซึ่งจะพบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เป็นกลุ่มก้อน (Crest) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนและมีทิศทางเคลื่อนที่ออกจากกันในแนวทิศเหนือและใต้ไปจนถึงละติจูดแม่เหล็ก $\pm 15-20^\circ$ และจะมีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูงซึ่งจะมีค่าสูงที่สุดที่เส้นละติจูดแม่เหล็ก $\pm 15-20^\circ$ หลังจากนั้นการไอออไนซ์จะเริ่มลดลงและกลุ่มก้อนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนเข้าหากันในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กอีกครั้งและจางหายไปในเวลากลางคืน [8] ช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนมากที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 18.00-01.00 น. ซึ่งช่วงเวลาที่เกิดความแปรปรวนขึ้นนี้เป็นช่วงเวลาเดียวกันกับค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 เกิดความแปรปรวนด้วย

4.3.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามฤดูกาล ในปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2549 โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาตามฤดูกาลออกเป็น 3 ฤดูกาลในแต่ละปีที่ทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549

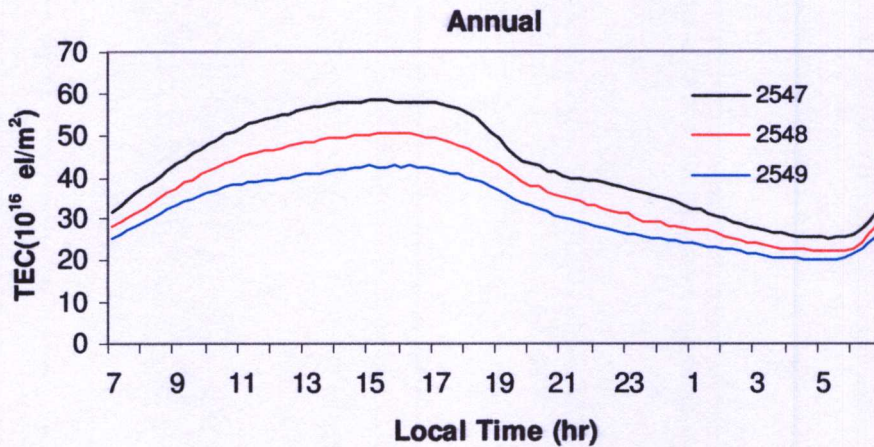


รูปที่ 4.11 (ต่อ)

รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวม ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับโดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม แบบรายวันของแต่ละเดือนในฤดูกาลนั้นๆ มาหาค่ามัธยฐาน ณ เวลาเดียวกัน ได้เป็นค่ามัธยฐานตามฤดูกาล เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดูกาล พบว่าในรูปที่ 4.7 (ก) , (ข) และ (ค) มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันดังคำอธิบาย (หัวข้อที่ 4.3.1) จากรูปเมื่อพิจารณาตามฤดูกาลจะเห็นว่า TEC ในฤดูกาล Equinox ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมียุคสูงกว่าฤดูกาล Winter และฤดูกาล Summer ตามลำดับ ตามเหตุผลใน (หัวข้อที่ 4.3.2) และจากรูปจะเห็นว่า TEC ในฤดูกาล Equinox , Summer และ Winter ในปี พ.ศ. 2547 จะมียุคสูงกว่าฤดูกาลต่างๆ ในปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับเนื่องจากค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2547 มีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2548 มีค่ามากกว่าปี พ.ศ. 2549

4.3.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบรายปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปีในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549

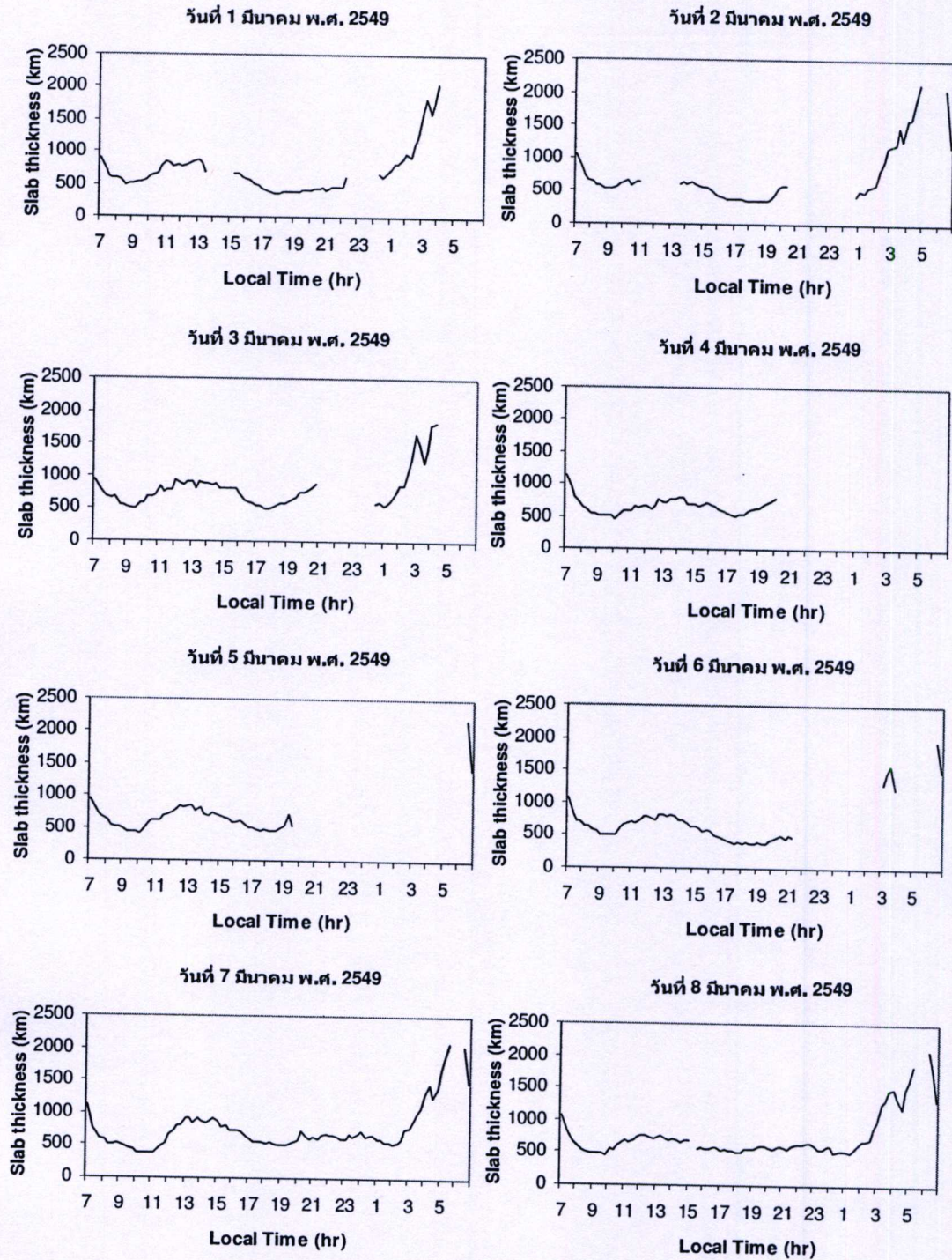
รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 โดยนำข้อมูลรายวันของแต่ละเดือนมาเรียงกันทั้งปีแล้วทำการหาค่ามัธยฐาน ณ เวลาเดียวกัน ได้มาเป็นค่ามัธยฐานแบบรายปี ซึ่งจากการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมของทั้ง 3 ปีมีแนวโน้มคล้ายกันกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวมแบบรายวัน เมื่อพิจารณาแบบรายปี จะสังเกตเห็นว่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงสุดในทุกๆ ช่วงเวลา และจะมีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2548 จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2549 สาเหตุที่ปริมาณอิเล็กตรอนรวมมีการเปลี่ยนแปลงลดต่ำลงเป็นผลมาจากปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในแต่ละปีมีค่าต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมจะแปรผันโดยตรงกับค่าปฏิบัติการจากดวงอาทิตย์ คือเมื่อปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่ามาก จะทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนรวมมีค่าสูง และ เมื่อปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าน้อย จะทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนรวม มีค่าต่ำ

4.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

จากผลการทดลองที่ได้ทำการคำนวณกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (F) หรือ ความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งคำนวณได้จากอัตราส่วนของปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ต่อ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสอง (2.14) ทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมงของแต่ละวันและทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ไปจนถึงเดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 จากสถานีตรวจวัดที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นารเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน แบบรายเดือน ตามฤดูกาล และ แบบรายปี สามารถแสดงได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในระหว่างวัน โดยได้นำตัวอย่างของวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 มาแสดงดังรูปที่ 4.13

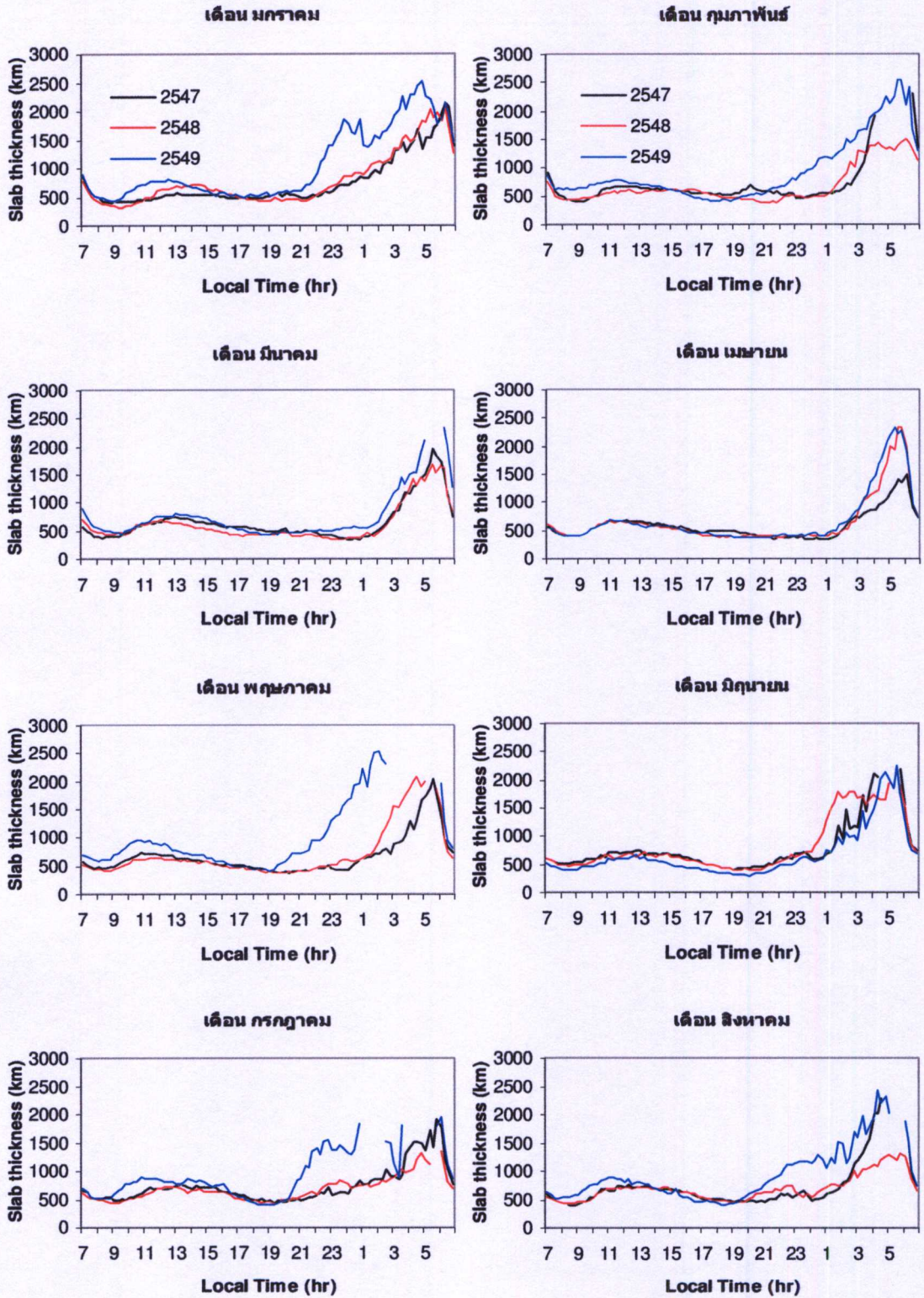


รูปที่ 4.13 กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวันในระหว่างวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 มีนาคม พ.ศ. 2549

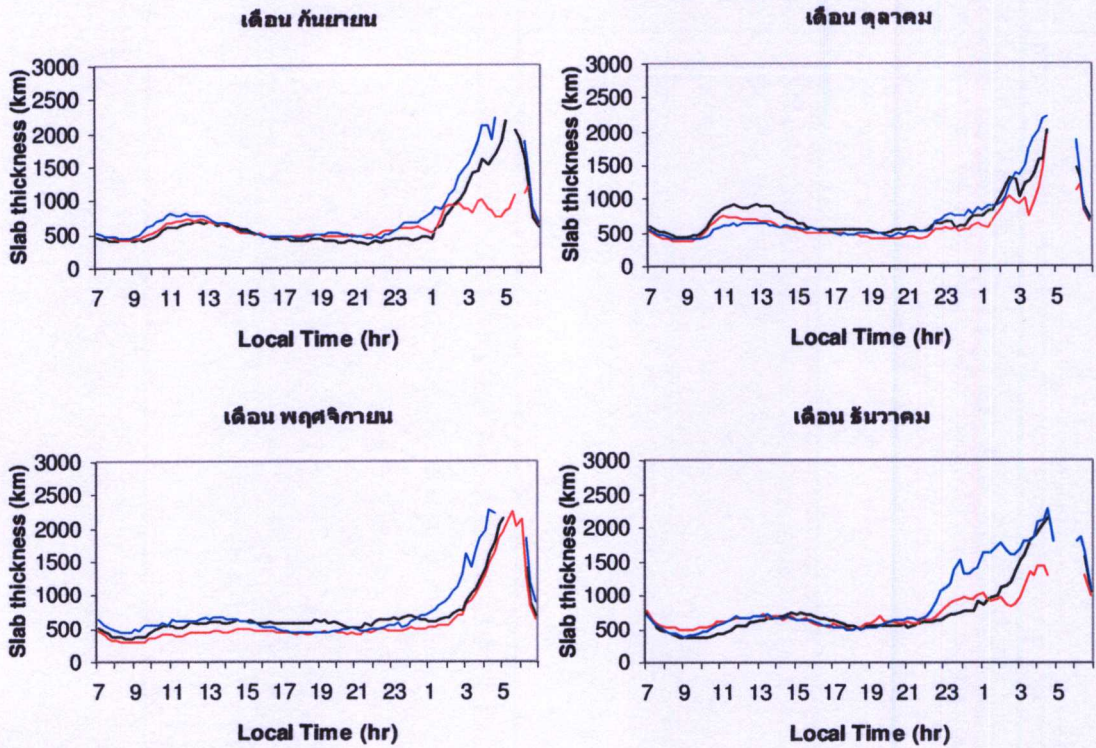
จากรูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลง กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายวัน ระหว่างวันที่ 1 ถึง 8 มีนาคม พ.ศ. 2549 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า τ ในแต่ละวันนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายกันคือ ในเวลากลางวันความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 500 – 600 กิโลเมตร และไม่มี การเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. – 14.00 น.เนื่องมาจากในช่วงเวลานี้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองมีค่าต่ำลงดังคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.1 ส่วนค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม มีความสูงคงที่จึงทำให้ τ มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลานี้และยังมีสาเหตุมาจากค่า solar flux ในเวลานั้นมีค่าเพิ่มขึ้น [30] ในเวลากลางคืนความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลาประมาณ 04.00 -05.00 น. τ จะมีค่าสูงที่สุดโดยช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาก่อนที่พระอาทิตย์จะขึ้น โดยสามารถสรุปได้ว่าเกิดขึ้นเมื่อ NmF2 มีค่าต่ำลงมาก และ TEC ยังคงที่ และจะมีค่าลดลงหลังจากที่พระอาทิตย์ขึ้นไปแล้วในเวลา 06.00 น. จากรูปเห็นว่า τ ในบางช่วงเวลาหายไปเนื่องจากในช่วงเวลานี้ไม่สามารถวัด foF2 ได้ดังคำอธิบายในหัวข้อ 4.1.1 จึงไม่สามารถที่จะคำนวณค่า τ ได้

4.4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือนอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549 เพื่อแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบรายเดือน แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549



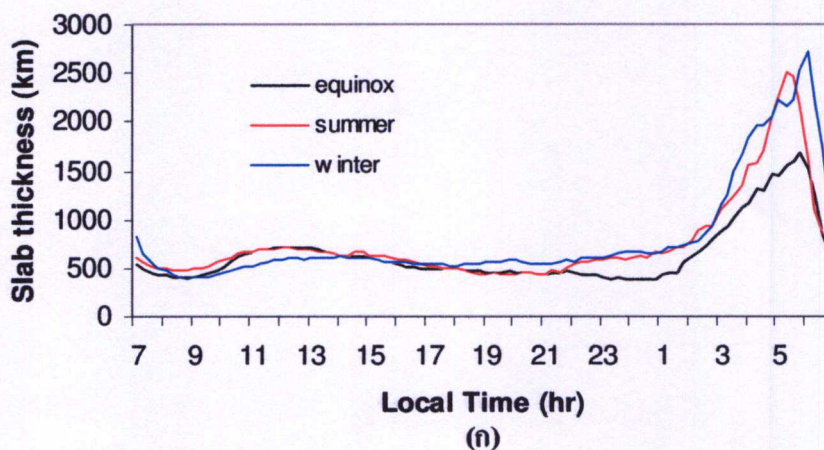
รูปที่ 4.14 (ต่อ)

จากรูปที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบ ความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายเดือน ของแต่ละปี ตั้งแต่เดือน มกราคม พ.ศ. 2547 ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2549 โดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการคำนวณหาค่าอัตราส่วนของ ค่ามัธยฐานปริมาณอิเล็กตรอนรวมแบบรายเดือนกับ ค่ามัธยฐานความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองแบบรายเดือน เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเดือน จากรูป จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลง τ ในแต่ละเดือนมีแนวโน้ม การเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงแบบรายวันกล่าวคือ ในเวลากลางวันความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 500 กิโลเมตร และไม่มี การเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. – 14.00 น. ดังเหตุผลในหัวข้อที่ 4.4.1 ในเวลากลางคืนความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลาประมาณ 04.00 -05.00 น. τ จะมีค่าสูงที่สุดโดยช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่ก่อนที่พระอาทิตย์จะขึ้น โดยสามารถสรุปได้ว่าเกิดขึ้นเมื่อ $N_{m}F2$ มีค่าต่ำลงมาก และ TEC ยังคงที่ และจะมีค่าลดลงหลังจากที่พระอาทิตย์ขึ้นไปแล้วในเวลา 06.00 น. เมื่อทำการเปรียบเทียบแบบรายเดือนจะเห็นว่า τ ในทุกๆเดือนยกเว้นเดือนมิถุนายนของปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าทุกๆเดือนของปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 เนื่องจากค่า τ จะแปรผันตรงข้ามกับค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ คือเมื่อค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าสูง τ จะมีค่าต่ำและเมื่อค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ τ จะมีค่า

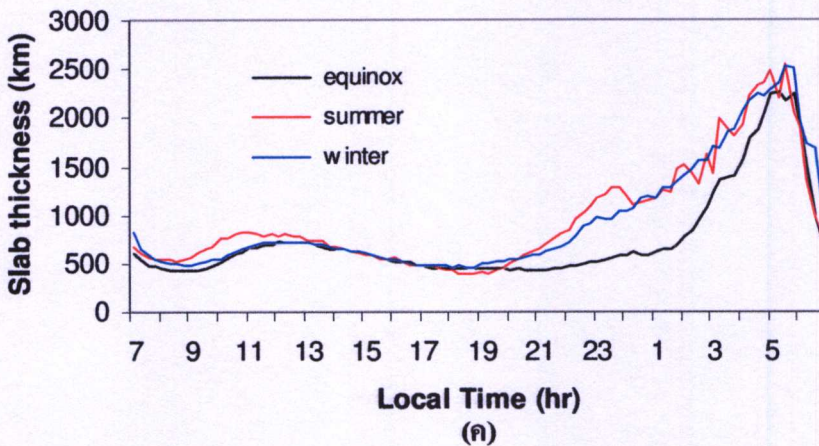
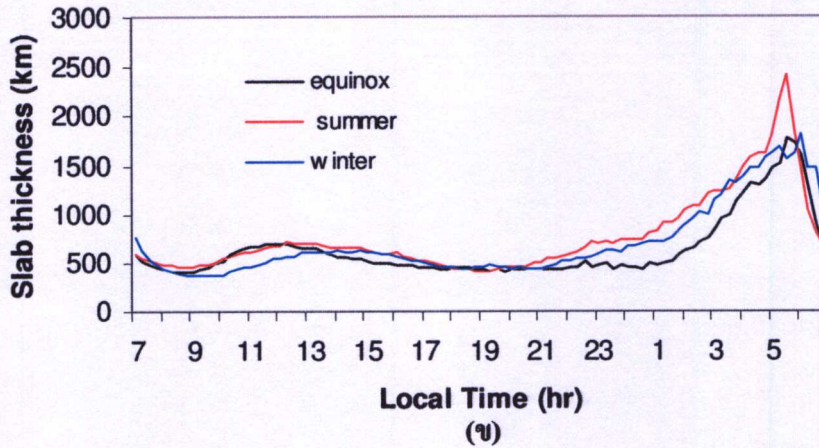
สูง ซึ่งช่วงปี พ.ศ. 2549 เป็นช่วงที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ และที่ค่า τ ในเดือนมิถุนายน ปี พ.ศ. 2549 มีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 เนื่องจาก TEC ในปี พ.ศ. 2549 มีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 แต่ NmF2 ในปี พ.ศ. 2549 มีค่าใกล้เคียงกับค่าในปี พ.ศ. 2548 และ พ.ศ. 2547 และตามปกติแล้ว τ ในทุกๆเดือนของปี พ.ศ. 2548 ควรที่จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2547 แต่จากรูปจะเห็นได้ว่า τ ในเกือบทุกเดือนของปี พ.ศ. 2548 มีค่าใกล้เคียงและต่ำกว่า τ ในปี พ.ศ. 2547 เนื่องจาก TEC ในทุกๆเดือนของปี พ.ศ. 2548 มีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2547 แต่ NmF2 ในทุกๆเดือนของปี พ.ศ. 2548 มีค่าใกล้เคียงกับปี พ.ศ. 2547 โดยที่ความหนาของชั้นจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญ 3 พารามิเตอร์คือ ตำแหน่งละติจูด , ฤดูกาล และ จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ [30]

4.4.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามฤดูกาล ในปี พ.ศ. 2547 ถึง พ.ศ. 2549 โดยในวิทยานิพนธ์นี้มีการแบ่งช่วงการพิจารณาตามฤดูกาลออกเป็น 3 ฤดูกาลในแต่ละปีที่ทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549



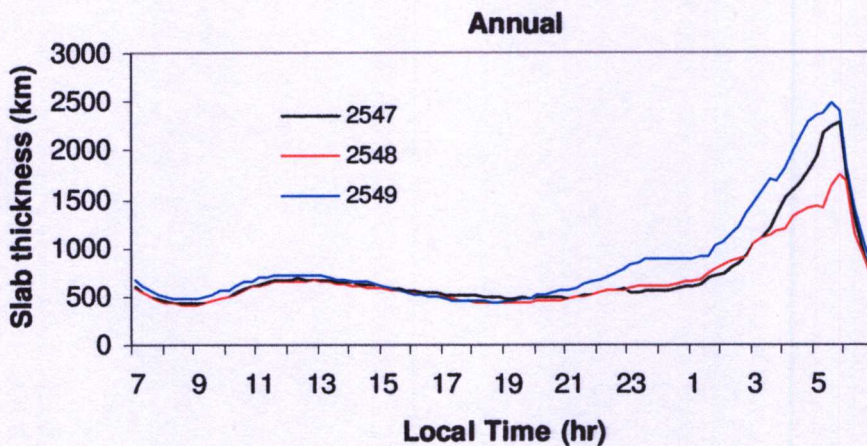
รูปที่ 4.15 (ต่อ)

รูปที่ 4.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ตามฤดูกาล (ก) ปี พ.ศ. 2547 (ข) ปี พ.ศ. 2548 (ค) ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับโดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการหาค่าอัตราส่วนของค่ามัธยฐานปริมาณอิเล็กตรอนรวมตามฤดูกาล กับค่ามัธยฐานความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองตามฤดูกาล พบว่าในรูปที่ 4.7 (ก) , (ข) และ (ค) มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คล้ายกับการเปลี่ยนแปลงในแบบรายเดือนคือ ในเวลากลางวันความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 500 กิโลเมตร และไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. - 14.00 น. ดังคำอธิบายในหัวข้อ 4.4.1 ในเวลากลางคืน τ โดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลาประมาณ 04.00 - 05.00 น. ความหนาจะมีค่าสูงที่สุดโดยช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาก่อนที่พระอาทิตย์จะขึ้น เมื่อทำการพิจารณาตามฤดูกาลจะเห็นได้ว่า τ ในฤดูกาล Equinox ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 มีค่าต่ำสุดและต่ำกว่าฤดูกาล Summer และ Winter จากรูปจะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลา 07.00 น. ถึง 19.00 น. ของทุกฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมี

ค่าความหนาใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการเปลี่ยนในลักษณะเดียวกัน และจากกราฟในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นของปี พ.ศ. 2547 ฤดูกาล Winter จะมีค่าสูงกว่า ฤดูกาล Summer และ ฤดูกาล Equinox ส่วนในปี พ.ศ. 2548 ในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น ฤดูกาล Summer จะมีค่าสูงกว่า ฤดูกาล Winter และ ฤดูกาล Equinox ตามลำดับ

4.4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบรายปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549

รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบกลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 โดยกราฟที่นำมาแสดงนี้ได้มาจากการหาอัตราส่วนของค่ามัธยฐานปริมาณอิเล็กตรอนรวมรายปี กับค่ามัธยฐานความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้นเอฟสองรายปี ได้เป็นค่ามัธยฐานความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบรายปี ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของทั้ง 3 ปีมีแนวโน้มคล้ายกันกับการเปลี่ยนแปลงความหนา แบบรายเดือน ดังคำอธิบายในหัวข้อ 4.4.2 จากรูปเมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่า τ ในปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 เนื่องจากในปี พ.ศ. 2549 ค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์จะมีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2548 และ พ.ศ. 2547 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลา 07.00 น. ถึง 19.00 น. ของทุกปีในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมีค่า

ความหนาใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการเปลี่ยนในลักษณะเดียวกันและจากกราฟจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 03.00 – 05.00 น. ในปี พ.ศ. 2548 จะมีค่าต่ำกว่าปี 2547 เนื่องจากค่ามัธยฐานของ TEC แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2548 มีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2547 ในช่วงเวลาดังกล่าวแต่ค่ามัธยฐานของ NmF2 แบบรายปี ช่วงเวลา 03.00 – 05.00 น. ในปี พ.ศ. 2548 มีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2547 เมื่อนำไปหาค่าอัตราส่วนระหว่าง TEC กับ NmF2 จึงได้ผลดังที่กล่าวมาข้างต้น

ต่อไปจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (หน่วยเป็น กิโลเมตร) ในช่วงเวลากลางวัน (08.00–16.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20.00–04.00 น.) สำหรับทั้ง 3 ฤดูกาลและแบบรายปีในปีพ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลากลางวัน (08.00–16.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20.00–04.00 น.) สำหรับทั้ง 3 ฤดูกาลและแบบรายปีในปี พ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549

	Time	Equinox	Summer	Winter	Year
2547	Day	579.61	607.1	525.48	570.73
	Night	556.83	684.63	727.64	656.37
2548	Day	538.07	574.93	495.24	536.08
	Night	537.9	758.19	678.48	658.19
2549	Day	569.71	646.06	592.9	602.89
	Night	685.46	977.89	1001.65	888.33

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยของความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์(หน่วยเป็น กิโลเมตร)ในช่วงเวลากลางวัน (08.00–16.00 น.) และช่วงเวลากลางคืน (20.00–04.00 น.) สำหรับทั้ง 3 ฤดูกาลและแบบรายปีในปีพ.ศ. 2547 ถึงปี พ.ศ. 2549 จากตารางจะเห็นว่าค่าเฉลี่ยในช่วงเวลากลางคืนของ τ แบบรายปีของทั้ง 3 ปีจะมีค่าสูงกว่าช่วงเวลากลางวันของทุกปี เมื่อพิจารณาคูตามฤดูกาลจะพบว่าค่าเฉลี่ยในช่วงเวลากลางคืนทั้ง 3 ฤดูกาลของทั้ง 3 ปีจะมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยในช่วงเวลากลางวันยกเว้นฤดูกาล Equinox ในปี พ.ศ. 2547 และ ปี พ.ศ. 2548 เมื่อสังเกตค่าเฉลี่ยในช่วงเวลากลางวันจะพบว่าในฤดูกาล Summer ของทั้ง 3 ปี จะมีค่าสูงกว่าฤดูกาล Equinox และ Winter พิจารณาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลากลางคืนของ τ ในฤดูกาล Equinox ของทั้ง 3 ปี มีค่าต่ำสุดและฤดูกาล Winter จะมีค่าสูงที่สุดยกเว้นในปี พ.ศ. 2548 ฤดูกาล Summer มีค่าสูงสุด จากตารางค่าเฉลี่ยในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนของ τ ทั้งแบบฤดูกาลและรายปีสังเกตเห็นว่าในปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 เนื่องมาจากค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปีนี้มีค่าต่ำกว่าปีอื่นๆ

4.4.5 การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของค่า TEC , NmF2 และ τ ตามฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุด (maximum) ต่อค่าต่ำสุด (minimum) ของค่าเฉลี่ยทั้ง 3 พารามิเตอร์คือ TEC , NmF2 และ τ ตามฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของค่าเฉลี่ยทั้ง 3 พารามิเตอร์ตามฤดูกาล ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549

Year	Ratio ^a	Equinox	Summer	Winter
2547	TEC Max	62.99	52.07	60.7
	TEC Min	25.04	26.54	24.26
	TEC Ratio	2.52	1.96	2.5
	NmF2 Max	1.29×10^{12}	1.04×10^{12}	1.11×10^{12}
	NmF2 Min	1.66×10^{11}	1.32×10^{11}	1.14×10^{11}
	NmF2 Ratio	7.81	7.89	9.76
	τ Max	1533	2042	2197
	τ Min	398	434	402
	τ Ratio	3.84	4.7	5.45
2548	TEC Max	53.23	47.58	51.33
	TEC Min	22.38	23.56	20.99
	TEC Ratio	2.38	2.02	2.44
	NmF2 Max	1.2×10^{12}	1.04×10^{12}	1×10^{12}
	NmF2 Min	1.37×10^{11}	1.1×10^{11}	1.2×10^{11}
	NmF2 Ratio	8.81	9.45	8.27
	τ Max	1717	2130	1729
	τ Min	412	406	369
	τ Ratio	4.16	5.24	4.68
	TEC Max	47.32	38.74	43.32
	TEC Min	20.69	21.17	19.17
	TEC Ratio	2.29	1.83	2.26

2549	NmF2 Max	1.04×10^{12}	9×10^{11}	8.59×10^{11}
	NmF2 Min	9.8×10^{10}	9.07×10^{10}	8.18×10^{10}
	NmF2 Ratio	10.63	9.92	10.49
	τ Max	2238	2334	2341
	τ Min	422	390	461
	τ Ratio	5.29	5.98	5.07

จากตารางได้ทำการศึกษาค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุดของค่าเฉลี่ยทั้ง 3 พารามิเตอร์ตามฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 โดยค่า Max แทนด้วยค่าสูงสุด ค่า Min แทนด้วยค่าต่ำสุด Ratio แทนอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดต่อค่าต่ำสุด จากตารางจะเห็นได้ว่า TEC Ratio ในฤดูกาล Equinox ปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าฤดูกาล Winter และ Summer ในปีเดียวกัน และจะมีค่าสูงกว่าในปี พ.ศ. 2548 กับปี พ.ศ. 2549 ดังเหตุผลในหัวข้อที่ 4.3.2 จากตารางจะเห็นว่า TEC Ratio ในทุกฤดูกาลของปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และปี พ.ศ. 2549 เนื่องจากค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2547 มีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ เมื่อพิจารณา NmF2 Ratio จากตารางจะพบว่า NmF2 ในฤดูกาล Equinox , Summer และ Winter ในปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 กับ ปี พ.ศ. 2547 เนื่องจากในฤดูกาลดังกล่าวมีค่า NmF2 ต่ำสุด ดังนี้ 9.82×10^{10} , 9.08×10^{10} และ 8.18×10^{10} e/m³ ในปี พ.ศ. 2548 มีค่าต่ำสุด คือ 1.37×10^{11} , 1.11×10^{11} และ 1.22×10^{11} e/m³ ส่วนในปี พ.ศ. 2547 ค่าต่ำสุด คือ 1.66×10^{11} , 1.32×10^{11} และ 1.14×10^{11} e/m³ แต่ค่า NmF2 สูงสุด ในแต่ฤดูกาลของปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 มีค่าใกล้เคียงกันเมื่อนำไปหารค่าอัตราส่วนจึงทำให้ค่า NmF2 ในฤดูกาล Equinox , Summer และ Winter ในปี พ.ศ. 2549 มีค่าสูงกว่าปีดังกล่าวและยังมีสาเหตุมาจาก ค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2549 มีค่าต่ำ จึงทำให้ค่าต่ำสุดของ NmF2 มีค่าต่ำตามไปด้วย จากตารางเมื่อพิจารณาค่า τ Ratio จะเห็นว่า τ ในฤดูกาล Equinox , Summer และ Winter ของปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าในปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 ในฤดูกาลเดียวกันเนื่องมาจากค่า τ แปรผันตรงข้ามกับค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ซึ่งในปี พ.ศ. 2549 ค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มีค่าต่ำกว่าปีอื่นๆจึงทำให้ค่า τ มีค่าสูงกว่า เมื่อพิจารณาในปี พ.ศ. 2547 จะเห็นได้ว่าค่า τ ในฤดูกาล Winter จะมีค่าสูงกว่า ฤดูกาล Summer และ Equinox ตามลำดับ

บทที่ 5

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ความถี่วิกฤตของชั้น F2 และปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ในบทนี้จะกล่าวถึง การศึกษาความสัมพันธ์ในวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric storms) โดยใช้ความถี่วิกฤตของชั้น F2 และปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งในงานวิจัยเรื่องเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ต้องอาศัยความสัมพันธ์ของวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก (Geomagnetic storms) ซึ่งจะใช้ ค่า Dst เป็นตัวบ่งบอกถึงระดับความรุนแรงของพายุแม่เหล็กโลก และศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของ foF2 และ TEC โดยหาเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์ทั้ง 2 เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลงของพายุไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2549

5.1 หลักการเกี่ยวกับการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์

การเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเป็นประจำ รูปแบบที่เกิดซ้ำ ซึ่งได้จากการสังเกตและการทดลองสามารถนำไปใช้ในการแก้ไข การประมาณค่าหรือการคำนวณ สำหรับผลกระทบในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ส่งผลกระทบต่อ การแพร่กระจายคลื่นวิทยุ การเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ความปั่นป่วนไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric disturbances) โดยปกติจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆไม่เกินชั่วโมง ในขณะที่การเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric storms) จะเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ยาวนานกว่า เกิดขึ้นหลายชั่วโมงและอาจจะเกิดขึ้นตลอดทั้งวันหรือมากกว่านั้น การเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยปกติจะมีความสัมพันธ์กับการรบกวนในชั้นบรรยากาศแมกนีโตสเฟียร์ และ เทอร์โมสเฟียร์ [12]

พายุไอโอโนสเฟียร์เป็นผลมาจากพลังงานสูงที่ไหลไปสู่ชั้นบรรยากาศที่สูงกว่า (Upper atmosphere) ซึ่งสัมพันธ์กับพายุแม่เหล็กโลก การเปลี่ยนแปลงในสนามแม่เหล็กโลกเป็นผลจากผลกระทบของอนุภาคลมสุริยะในการเพิ่มความเร็วและความหนาแน่นบนชั้นบรรยากาศแมกนีโตสเฟียร์ซึ่งลมสุริยะที่มีความรุนแรงเป็นผลจากการพุ่งออกของมวลจากชั้นโคโรน่า (Coronal mass

ejection) หรือ โพรงโคโรน่า (Coronal hole) ซึ่งอนุภาคลมสุริยะจะพัดพาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องไปสู่โลก [34]

5.1.1 พายุไอโอโนสเฟียร์แบบลบ (Negative ionospheric storms)

สาเหตุการเกิดพายุแบบลบ (Negative storm) [12] เนื่องจากการลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนซึ่งเป็นความสัมพันธ์ทางกระบวนการของไอออน การลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอนหรือช่วงเวลาที่ึ่เป็นลบของการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงในความหนาแน่นซึ่งสัมพันธ์กับออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N_2) ที่ถูกนำพาโดยการรบกวนของชั้นบรรยากาศแมกนีโตสเฟียร์ เป็นผลมาจากการไหลเข้ามาของพลังงานที่ บริเวณขั้วโลก (polar regions) ในช่วงปฏิกิริยาแสงอรุณ (Auroral activity) เป็นผลมาจากความร้อนของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ การขยายออกของแหล่งความร้อนในชั้นบรรยากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่สูงขึ้นของอนุภาคแก๊สที่เป็นกลาง และ ณ เวลาเดียวกันการเปลี่ยนแปลงในการเคลื่อนตัวของชั้นบรรยากาศ ที่ความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นสาเหตุในการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจน (N_2) ที่มากกว่าออกซิเจน (O) และการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจน เป็นผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการรวมตัวกลับ (Recombination coefficient) สูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุในการลดลงของความหนาแน่นอิเล็กตรอน

5.1.2 พายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวก (Positive ionospheric storms)

สาเหตุการเกิดพายุแบบบวก (Positive storm) [12] เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอิเล็กตรอนหรือการเกิดการเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวกไม่สามารถอธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วน N_2/O แต่สามารถที่จะอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ของพลาสมาไปยังความสูงที่สูงกว่าในช่วงพายุแบบบวก การเคลื่อนที่ไปในทิศทางเหนือขึ้นไป (Upward) ของพลาสมาเชื่อได้ว่ามีสาเหตุมาจาก 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยแรก เกิดจากกลไกของลมในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ในระนาบแนวนอนจากขั้วโลก ไปสู่เส้นศูนย์สูตรและผลักให้พลาสมาขนานขึ้นไปกับเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic lines) ลมในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์เป็นสาเหตุของการไหลเข้ามาอย่างฉับพลันของพลังงานที่ไหลไปสู่ บริเวณขั้วโลก ในช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กและผลของลมในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ในการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดการรบกวนในชั้นบรรยากาศ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 150 เมตร/วินาที ปัจจัยสอง คือ upward component , เส้นตั้งฉากกับ เส้นแรงแม่เหล็ก , ผลจาก $E \times B$ drift ซึ่งเป็นสาเหตุที่เกิดจากสนามไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออกเกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศแมกนีโตสเฟียร์ เนื่องจากความหนาแน่นของ ไนโตรเจน (N_2) ลดลงพร้อมกับความสูง

สัมประสิทธิ์การรวมตัวกลับเกิดขึ้นเล็กน้อยในช่วงเวลากลางวันกระบวนการผลิตไอออน พลาสมา จะเคลื่อนตัวอย่างคงที่ไปยังความสูงที่สูงกว่าจากชั้นซึ่งมีความสูงที่ 180 km ดังนั้นความหนาแน่น อิเล็กตรอนจึงเพิ่มขึ้นมากกว่าระดับปกติ ณ เวลานี้

5.1.3 ผลกระทบที่สำคัญของพายุไอโอโนสเฟียร์

การเกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ แสดงให้เห็นถึงความรุนแรงจากสภาพอากาศใน อวกาศ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบเทคโนโลยีภาคพื้นดินและระบบพื้นฐานในอวกาศ ผลกระทบ เหล่านี้ได้แก่ การเกิดพลังงานไฟฟ้าตกและพลังงานไฟฟ้าดับทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงข่าย พลังงานไฟฟ้า, ทำความเสียหายต่อดาวเทียมเนื่องจากอนุภาคพลังงานที่สูง, เป็นอันตรายต่ออากาศ ยานทุกชนิด, ทำให้เกิดการผิดพลาดต่อจีพีเอส (ระบบดาวเทียมบอกพิกัด) และระบบการเดินเรือใน ย่านความถี่ VLF, เกิดการสูญเสียในการสื่อสารย่านความถี่ HF, และเกิดการรบกวนการเชื่อมโยง การสื่อสารดาวเทียมในย่าน UHF (UHF Satellite links) [34]

5.2 ค่าดัชนี Dst (Dst index)

ค่า ดัชนี Dst [32] ได้มาจากสถานีวัดสนามแม่เหล็ก (Magnetometer stations) บริเวณเส้น ศูนย์สูตร ที่ละติจูดนี้ส่วนประกอบ H (North ward) ของการรบกวนสนามแม่เหล็กได้รับอิทธิพล จาก ความหนาแน่นของพลังงานจาก ring current ในชั้นบรรยากาศแมกนีโตสเฟียร์ ค่า ดัชนี Dst เป็นการวัดค่าโดยตรงของค่าเฉลี่ยในแต่ละชั่วโมงของการเกิดการรบกวนแม่เหล็กโลก การรบกวน ที่มีค่าเป็นลบมาก บ่งบอกถึง ความเข้มพลังงานจาก ring current ที่เพิ่มขึ้นและเป็นแบบฉบับการวัด ค่าเวลาที่เป็นชั่วโมง การรบกวนที่มีค่าเป็นลบนี้อาจเกิดขึ้นไม่กี่ชั่วโมง หรือเกิดขึ้นเป็นระยะเวลาที่ ยาวนานหลายชั่วโมง ช่วงเวลาเหล่านี้เรียกว่าการเกิดพายุแม่เหล็ก (Magnetic storm) ช่วงเวลาในการ เกิดพายุนั้น สามารถจำแนกประเภทในการสังเกต หรือช่วงเวลาในการเกิด ถ้าเกิดในช่วงเวลาสั้น และมีความรุนแรงเล็กน้อยเรียกว่าเกิด substorm โดยใช้ค่าดัชนี AE (AE index) เป็นตัววัด เวิร์ชชัน ของดัชนี ได้มีการคำนวณและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิด storms และ substorm ค่าดัชนีที่ บ่งชี้ระดับความรุนแรงของการเกิดพายุแม่เหล็กสามารถดูได้จาก ตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าดัชนี Dst ที่แบ่งระดับความรุนแรงของการเกิดพายุแม่เหล็ก [33]

ระดับความรุนแรงของพายุ	Dst (nT)
รุนแรง	≤ -100
ปานกลาง	-50
เล็กน้อย	-30

จากตารางที่ 5.1 แสดงถึงค่าดัชนี Dst ที่แบ่งระดับความรุนแรงของการเกิดพายุแม่เหล็กได้ ดังนี้คือ ค่า Dst ที่มีค่าเท่ากับ -100 nT หรือน้อยกว่าถือได้ว่าเป็นพายุแม่เหล็กที่รุนแรงถึงรุนแรงมาก ค่า Dst ที่ -50 nT ถือได้ว่าเป็นพายุแม่เหล็กในระดับปานกลาง และที่ค่า Dst เท่ากับ -30 nT ถือได้ว่าเป็นพายุแม่เหล็กเล็กน้อย

ข้อมูลค่าดัชนี Dst ที่ใช้ในการทำวิจัยเรื่องนี้ได้มาจากหน่วยงาน World Data Center for Geomagnetism, Kyoto [31] โดยสถานีวัดค่าสนามแม่เหล็กโลกมีอยู่ด้วยกัน 4 สถานี คือ Hermanus , Kakioka , Honolulu และ San Juan ซึ่งตั้งอยู่ในแนวเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก

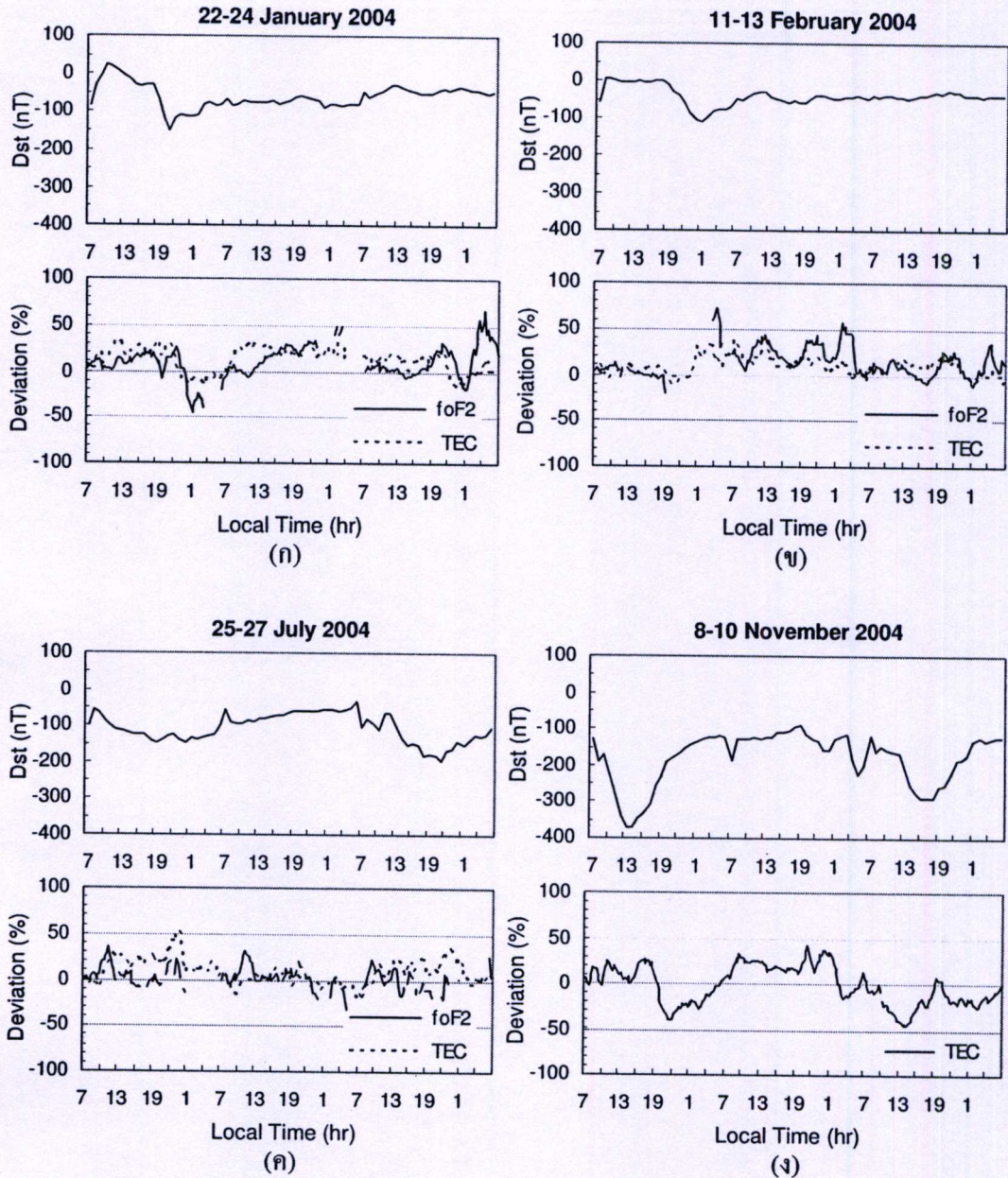
5.3 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนหาได้จาก

$$deviation(\%) = \frac{x_i - x_m}{x_m} \times 100 \quad (5.1)$$

โดย x_i แทน foF2 หรือ TEC ในช่วงวันที่ทำการศึกษา ส่วน x_m คือค่ามัธยฐาน (median) แบบรายเดือนซึ่งเป็นเดือนเดียวกันกับวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก

ซึ่งในส่วนของผลที่นำมาแสดงจะใช้ข้อมูลในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกเพียงบางส่วนในช่วงปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3



รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2547 (ก) วันที่ 22-24 มกราคม (ข) วันที่ 11-13 กุมภาพันธ์ (ค) วันที่ 25-27 กรกฎาคม (ง) วันที่ 8-10 พฤศจิกายน

จากรูปที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3 แสดงถึงวันที่เกิดเหตุการณ์ พายุไอโอโนสเฟียร์ โดยอ้างอิงจากวันที่เกิด พายุแม่เหล็กโลกซึ่งใช้ข้อมูลในช่วงปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จากการศึกษาพบว่าวันที่เกิดเหตุการณ์ พายุแม่เหล็กโลก มีทั้งหมด 21 วันในระยะเวลา 3 ปี ที่ทำการศึกษา โดยพิจารณาว่าเกิดพายุแม่เหล็กโลกต่อเมื่อค่า $Dst \leq -100$ nT ในปี พ.ศ. 2547 เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว 8 วัน ได้แก่ วันที่ 22 มกราคม , วันที่ 11 กุมภาพันธ์ , วันที่ 25 กรกฎาคม , วันที่ 27 กรกฎาคม , วันที่ 30 สิงหาคม และวันที่ 8-10 พฤศจิกายน ในปี พ.ศ. 2548 เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว 11 วัน ได้แก่ วันที่ 18 และ 22 มกราคม , วันที่ 8 , 15 , 16 และ 30 พฤษภาคม , วันที่ 12 มิถุนายน , วันที่ 24 , 25 และ 31 สิงหาคม กับวันที่ 11 ก.ย. ในปี พ.ศ. 2549 เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว 2 วัน ได้แก่ วันที่ 14 เมษายนและวันที่ 15 ธันวาคม เพื่อหาความสัมพันธ์ในการเกิด พายุไอโอโนสเฟียร์ ทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ พารามิเตอร์ foF2 และ TEC ในวันที่เกิด พายุแม่เหล็กโลกเทียบกับค่ามัธยฐานในเดือนที่เกิด พายุแม่เหล็กโลก

จากรูปที่ 5.1-5.3 ใช้ข้อมูล 3 วันต่อเนื่องกัน โดยในวันแรกจะเป็นวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ส่วนอีก 2 วันที่ต่อเนื่องกันจะเป็นวันที่เหตุการณ์ปกติ ยกเว้น ในปีพ.ศ. 2547 ช่วงวันที่ 25-27 กรกฎาคม จะเกิดพายุแม่เหล็กโลก 2 วันคือ วันที่ 25 และ 27 กรกฎาคม ในช่วงวันที่ 8-10 พฤศจิกายน เกิดพายุแม่เหล็กโลกทั้ง 3 วัน และในปี พ.ศ. 2548 ช่วงวันที่ 15-17 พฤษภาคม เกิดพายุแม่เหล็กโลก 2 วันคือวันที่ 15-16 พฤษภาคม ช่วงวันที่ 24-26 สิงหาคม เกิดพายุแม่เหล็กโลก 2 วันคือวันที่ 24-25 สิงหาคม

จากรูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับค่า Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2547 (ก) วันที่ 22-24 มกราคม (ข) วันที่ 11-13 กุมภาพันธ์ (ค) วันที่ 25-27 กรกฎาคม (ง) วันที่ 8-10 พฤศจิกายน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.1 (ก) จะเห็นได้ว่าเกิดพายุแม่เหล็กโลกในวันที่ 22 มกราคม ช่วงเวลา 20.00 – 02.00 น. โดยที่ ค่า Dst ต่ำสุด เท่ากับ -149 nT ณ เวลา 21.00 น. เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ในวันที่ 22 มกราคมมีค่าเป็นบวกตั้งแต่เวลา 7.00 – 22.30 น. และมีค่าเป็นลบตั้งแต่เวลาประมาณ 23.00 น. ไปจนถึงเวลา 7.00 น. ของวันที่ 23 มกราคม และมีค่าเป็นบวกตั้งแต่เวลา 7.30 น. ของวันที่ 23 มกราคม ไปจนถึงเวลา 21.45 น. ของวันที่ 24 มกราคม เมื่อสังเกตค่า TEC จะพบว่าเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวก (Positive Ionospheric storms) โดยเป็นบวกมากกว่า 30% ในช่วงเวลา 11.45 – 12.30 น. มีค่าสูงสุดที่เวลา 12.15 น. มีค่าเป็นบวก 36.46% คิดเป็น 19.9 TECU จากค่ามัธยฐาน และช่วงที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกค่า TEC มีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 20.30 – 22.00 น. มีค่าเป็นบวกสูงสุด 32.27% คิดเป็น 13.32 TECU ณ เวลา 21.00 น. ในวันที่ 23 มกราคม จะเห็นว่า TEC มีค่าเป็นบวกทั้งวันโดยมีค่าสูงกว่า 22% ตั้งแต่เวลา 8.45 – 15.15 น. และมีค่าเป็นบวกสูงสุดที่เวลา 14.00 น. มีค่าเป็นบวก 29.77% คิดเป็น 17.59 TECU ส่วนในวันที่ 24 มกราคม TEC มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจากค่ามัธยฐาน เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ foF2 จะเห็นว่าในวันที่ 22 มกราคม foF2 มีค่าเป็น

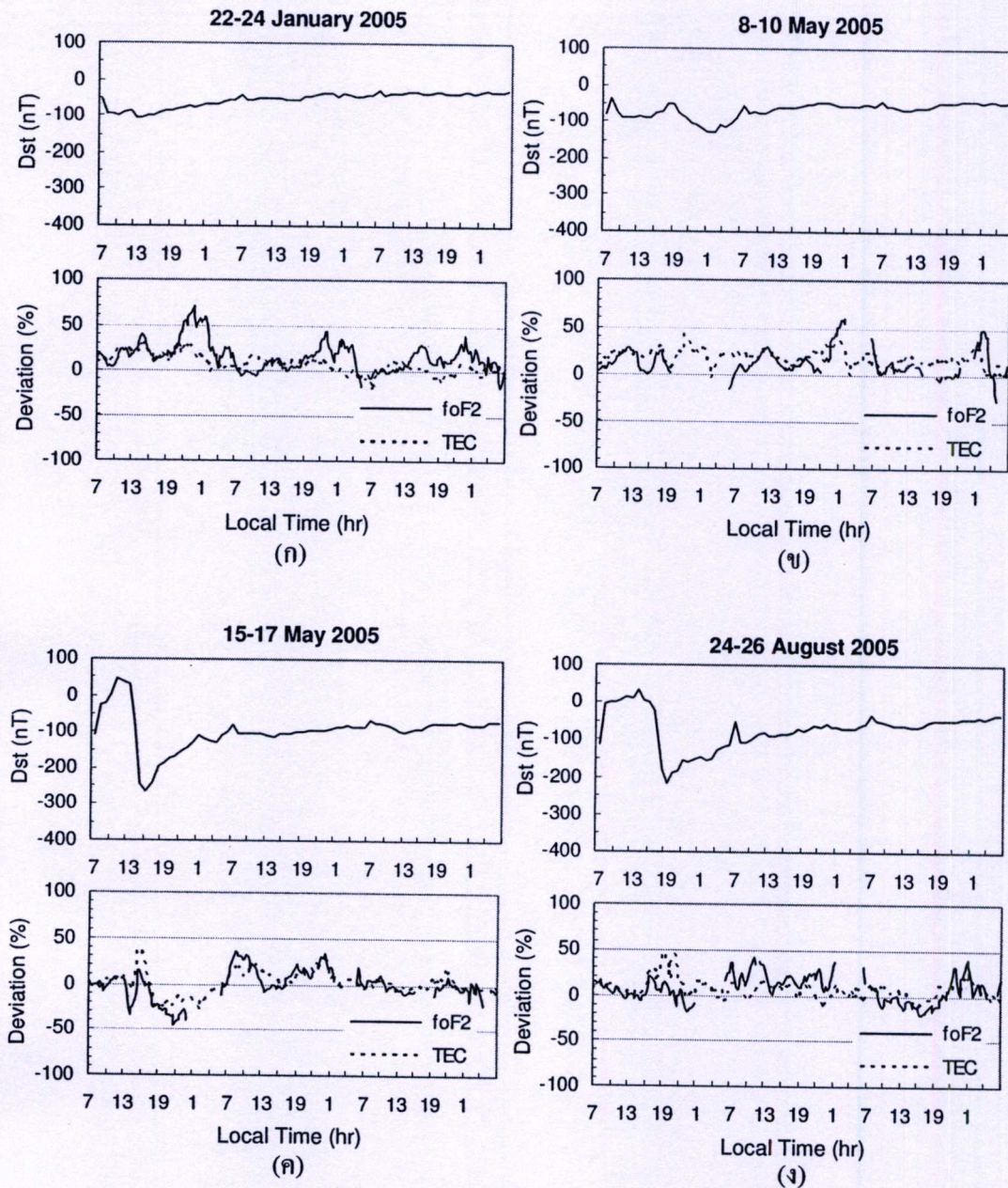
บวกในช่วงเวลา 7.00 – 23.45 น. โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 25.43% คิดเป็น 1.76 MHz ณ เวลา 22.30 น. และมีค่าเป็นลบ (Negative Ionospheric storms) ในช่วงเวลา 24.00 – 06.45 น. โดยมีค่าเป็นลบต่ำสุด -44.69% คิดเป็น -2.36 MHz ในวันที่ 23 มกราคม ค่า foF2 เป็นบวกในช่วงเวลา 12.00 – 06.45 น. และมีค่าเป็นบวกมากกว่า 20% ตั้งแต่เวลา 16.15 – 03.15 น. โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 48.86% คิดเป็น 1.93 MHz ส่วนในวันที่ 24 มกราคม foF2 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 7.00 – 19.15 น. โดยจะมีค่าสูงกว่า 20% ในช่วงเวลา 20.00 – 22.30 น. และมีค่าเป็นบวกสูงกว่า 30% ในช่วงเวลา 03.00 -06.15 น. โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 66.46% คิดเป็น 2.2 MHz

จากรูปที่ 5.1 (ข) จะเห็นได้ว่าวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกคือวันที่ 11 กุมภาพันธ์ ช่วงเวลา 24.00 – 01.00 น. โดยที่ ค่า Dst ต่ำสุดมีค่า -109 nT ณ เวลา 01.00 น. เปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบน ในวันที่ 11 กุมภาพันธ์ ค่า TEC มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 7.00 – 00.30 น. และมีค่าเป็นบวกสูงกว่า 20% ตั้งแต่เวลา 01.00 – 04.15 น. โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 32.87% คิดเป็น 8.64 TECU ณ เวลา 03.00 น. ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ TEC มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นบวกสูง ต่ำ และสูง ตามลำดับในช่วงเวลา 7.00 – 20.00 น. โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 39.27% คิดเป็น 12.8 TECU ณ เวลา 7.30 น. ส่วนในวันที่ 13 กุมภาพันธ์ ค่า TEC มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณา foF2 ในวันที่ 11 กุมภาพันธ์ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 7.00 – 00.30 น. และจะมีค่าเป็นบวกสูงกว่า 30% ในช่วงเวลา 03.45 -05.15 น. โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 72.34% คิดเป็น 2.25 MHz ในวันที่ 12 กุมภาพันธ์ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกับค่า TEC คือมีค่าเป็นบวกสูง ต่ำ และ สูง ตามลำดับ ในช่วงเวลา 10.15 – 04.30 น โดยมีค่าเป็นบวกสูงสุด 57.83% คิดเป็น 3.21 MHz ส่วนในวันที่ 13 กุมภาพันธ์ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จากรูปที่ 5.1 (ค) วันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกคือวันที่ 25 และ 27 กรกฎาคม ซึ่งในวันที่ 25 ช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก 12.00 – 06.00 น. โดยที่ ค่า Dst ต่ำสุดมีค่า -148 nT ณ เวลา 19.00 น. ในวันที่ 27 ช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก 7.00 น. , 10.00 น. และ 14.00 – 06.00 น. โดยที่ ค่า Dst ต่ำสุดมีค่า -197 nT ณ เวลา 21.00 น. เมื่อพิจารณาเปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันที่ 25 และ 27 กรกฎาคม มีค่าเป็นบวกสูงซึ่งตรงกับวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ในวันที่ 25 กรกฎาคม TEC มีค่าเป็นบวกตั้งแต่เวลา 10.30 – 06.45 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 55.01% คิดเป็น 16.69 TECU และในวันที่ 27 กรกฎาคม TEC มีค่าเป็นบวกในช่วงเวลา 10.00 – 02.45 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 36.37% คิดเป็น 11.26 TECU ในวันที่ 26 กรกฎาคม TEC เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อพิจารณา foF2 ในวันที่ 25 จะมีค่าเป็นบวกในช่วงเวลา 7.15 – 12.15 น. และเป็นลบเล็กน้อยในช่วงเวลา 15.30 – 18.45 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 36.06% คิดเป็น 2.51 MHz ในวันที่ 26 foF2 มีค่าเป็นบวกสูงสุด 31.45% ณ เวลา 11.15 น. และมีค่าเป็นลบต่ำสุด -31.51% ณ เวลา 05.00 น. ในวันที่ 27 foF2 มีค่าแปรปรวนซึ่งมีค่าเป็นบวกและลบสลับกัน โดยเป็นบวกสูงสุด 22% ณ เวลา 9.30 น. และเป็นลบต่ำสุด -23.7% ณ เวลา 20.45 น.

จากรูปที่ 5.1 (ง) วันที่เกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกคือวันที่ 8 – 10 พฤศจิกายน ในวันที่ 8 พฤศจิกายน Dst มีค่าต่ำสุดที่ -373 nT ณ เวลา 14.00 น. ในวันที่ 9 พฤศจิกายน Dst มีค่าต่ำสุดที่ -223 nT ณ เวลา 05.00 น. และในวันที่ 10 พฤศจิกายน Dst มีค่าต่ำสุดที่ -289 nT ณ เวลา 17.00 – 18.00 น. จากรูปไม่ได้นำ foF2 มาแสดงผลเนื่องจากในช่วงวันดังกล่าวอุปกรณ์ในวัด foF2 เสีย เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC จะเห็นได้ว่า TEC มีความแปรปรวนมากคือ เกิด พายุไอโอโนสเฟียร์ แบบบวกลบและลบ ทั้ง 3 วัน ซึ่งในวันที่ 8 พฤศจิกายน เป็นบวกในช่วงเวลา 7.00 – 19.15 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 26.83% คิดเป็น 16.88 TECU ณ เวลา 17.15 น. และเป็นลบช่วงเวลา 19.30 – 06.15 น. โดยเป็นลบต่ำสุด -39.76% คิดเป็น -17.6 TECU ณ เวลา 21.45 น. ในวันที่ 9 พฤศจิกายน TEC มีค่าเป็นบวกในช่วงเวลา 7.00 – 02.30 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 43% คิดเป็น 18.86 TECU ณ เวลา 21.15 น. ในวันที่ 10 พฤศจิกายน TEC เป็นลบเกือบทั้งวันโดยเป็นลบต่ำสุด -45.39% คิดเป็น -28.41 TECU ณ เวลา 14.15 น.

จากรูปที่ 5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับค่า Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2548 (ก) วันที่ 22-24 มกราคม (ข) วันที่ 8-10 พฤษภาคม (ค) วันที่ 15-17 พฤษภาคม (ง) วันที่ 24-26 สิงหาคม ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.2 (ก) จะเห็นได้ว่าวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกคือ วันที่ 22 มกราคม ในช่วงเวลา 13.00 – 15.00 น. Dst ต่ำสุดที่ -105 nT ณ เวลา 14.00 น. เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันที่ 22 มกราคม สังเกตได้ว่าเป็นบวกสูงในช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดพายุแม่เหล็กโลก โดยเป็นบวกในช่วงเวลา 7.00 – 02.30 น. ซึ่งเป็นบวกสูงสุด 33.79% คิดเป็น 11.56 TECU ณ เวลา 21.00 น. ในวันที่ 23-24 มกราคม TEC มีการเปลี่ยนแปลงจากค่ามัธยฐานเล็กน้อย เมื่อพิจารณา foF2 จะพบว่าในวันที่ 22-24 มกราคม ในแต่ละวันจะเป็นบวกเกือบทั้งวัน ซึ่งในวันที่ 22 มกราคม จะเป็นบวกสูงกว่า 23% อยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงเวลา 13.45 – 15.45 น. และ ช่วงเวลา 20.30 – 02.30 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 70.87% คิดเป็น 3.65 MHz ณ เวลา 23.45 น. ในวันที่ 23 มกราคม foF2 ในช่วงเวลา 7.00 – 20.00 น. มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และเป็นบวกสูงกว่า 20% อยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงเวลา 21.15 – 23.45 น. และ ช่วงเวลา 00.45 – 03.45 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 42.7% คิดเป็น 2.48 MHz ณ เวลา 23.00 น. ส่วนในวันที่ 24 มกราคม foF2 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยเป็นบวกสูงสุด 38.27% คิดเป็น 2.09 MHz ณ เวลา 23.30 น.



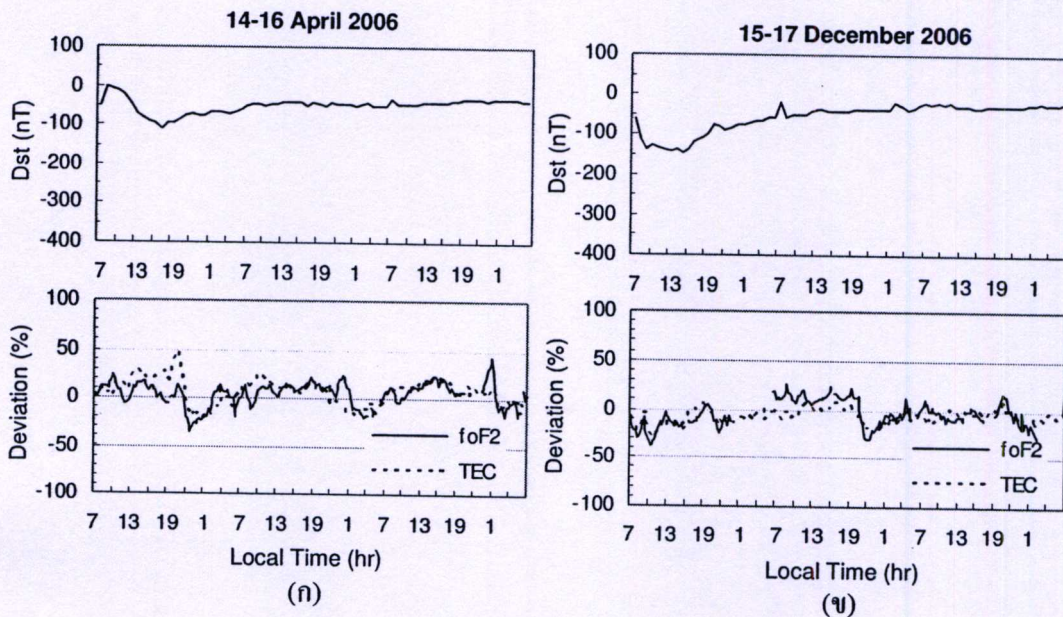
รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2548 (ก) วันที่ 22-24 มกราคม (ข) วันที่ 8-10 พฤษภาคม (ค) วันที่ 15-17 พฤษภาคม (ง) วันที่ 24-26 สิงหาคม

จากรูปที่ 5.2 (ข) วันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกคือ วันที่ 8 พฤษภาคม ช่วงเวลาที่เกิด 22.00 – 05.00 น. โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ -127 nT ณ เวลา 02.00 น. เฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันที่ 8-10 พฤษภาคม มีค่าเป็นบวกทั้ง 3 วัน โดยในวันที่ 8 พฤษภาคม ค่า TEC เป็นบวกสูงสุดในช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดพายุแม่เหล็กโลก เป็นบวกสูงสุด 44.32% คิดเป็น 13.02 TECU ณ เวลา 22.15 น. ในวันที่ 9 พฤษภาคม TEC เป็นบวกสูงสุด 44.54 % คิดเป็น 10.17 TECU ณ เวลา 00.45 น. วันที่ 10 พฤษภาคม TEC เป็นบวกสูงสุด 30.86% คิดเป็น 6.74 TECU ณ เวลา 01.30 น. เมื่อพิจารณา f_oF_2 ในวันที่ 8 พฤษภาคม ช่วงเวลา 19.45 – 05.45 น. ไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดพายุแม่เหล็กโลก ส่วนในวันที่ 9-10 พฤษภาคม f_oF_2 เป็นบวกเกือบทั้งวัน ซึ่งวันที่ 9 พฤษภาคม f_oF_2 เป็นบวกสูงสุด 59.47% คิดเป็น 2.73 MHz ณ เวลา 02.00 น. ในวันที่ 10 พฤษภาคม f_oF_2 เป็นบวกสูงสุด 49.16% คิดเป็น 2.07 MHz ณ เวลา 02.30 น.

จากรูปที่ 5.2 (ค) วันที่เกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกคือ วันที่ 15-16 พฤษภาคมในช่วงเวลา 15.00 น. ของวันที่ 15 ไปจนถึงเวลา 17.00 น. ของวันที่ 16 โดยค่า Dst มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -263 nT ณ เวลา 16.00 น. เมื่อพิจารณาเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ f_oF_2 จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เป็นบวกและลบคล้ายกันทั้ง 3 วัน ในวันที่ 15 พฤษภาคม TEC มีค่าเป็นบวกและลบสูงสุดในช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดพายุแม่เหล็กโลกโดยเป็นบวกสูงสุด 39.43% คิดเป็น 21.91 TECU ณ เวลา 15.45 น. และเป็นลบต่ำสุด $-27.93%$ คิดเป็น -14.65 TECU ณ เวลา 18.30 น. ในวันที่ 16 พฤษภาคม TEC เป็นบวกเกือบทั้งวันโดยเป็นบวกสูงสุด 28.64% คิดเป็น 7.21 TECU ณ เวลา 23.45 น. ส่วน ในวันที่ 17 พฤษภาคม TEC มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อสังเกต f_oF_2 ในวันที่ 15 พฤษภาคม จะเห็นว่ามีความเป็นลบสูงอยู่ 2 ช่วงคือช่วงเวลา 13.45 – 14.45 น. และช่วงเวลา 18.00 – 24.00 น. โดยเป็นลบต่ำสุดที่ $-45.68%$ คิดเป็น -3.6 MHz ณ เวลา 21.45 น. ในวันที่ 16 พฤษภาคม f_oF_2 มีค่าเป็นบวกสูงอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงเวลา 7.30 – 11.45 น. และ ช่วงเวลา 22.45 – 01.15 น. โดยมีค่าสูงสุด 34.97% คิดเป็น 2.92 MHz ณ เวลา 8.15 น. ในวันที่ 17 พฤษภาคม f_oF_2 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

จากรูปที่ 5.2 (ง) วันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกคือ วันที่ 24-25 สิงหาคม ในช่วงเวลา 18.00 น. ของวันที่ 24 ไปจนถึง 9.00 น. ของวันที่ 25 โดย Dst ต่ำสุดเท่ากับ -216 nT ณ เวลา 19.00 น. เฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันที่ 24-26 สิงหาคม มีค่าเป็นบวกเกือบทั้งวันในแต่ละวัน ดังกล่าว โดย TEC มีค่าเป็นบวกสูงสุดในช่วงเวลา 16.45 – 22.00 น. ของวันที่ 24 สิงหาคม ซึ่งตรงกับช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก โดยมีค่าสูงสุด 47.28% คิดเป็น 17.99 TECU ณ เวลา 19.15 น. ส่วน ในวันที่ 25-26 สิงหาคม ค่า TEC มีการเปลี่ยนแปลงจากค่ามัธยฐานเล็กน้อย จากการสังเกต f_oF_2 ในวันที่ 24 สิงหาคม จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักโดยเป็นบวกและลบสูงสุดประมาณ 20% ในวันที่ 25 สิงหาคม f_oF_2 เป็นบวกตลอดทั้งวัน โดยเป็นบวกสูงสุด 41.54% คิดเป็น 2.9 MHz ณ เวลา 11.15 น. ส่วนในวันที่ 26 สิงหาคม f_oF_2 มีค่าเป็นลบในช่วงเวลา 9.15 – 20.15 น. และมีค่า

เป็นบวกในช่วงเวลา 21.15 - 06.45 น. โดยเป็นบวกสูงสุด 40.3% คิดเป็น 2.22 MHz ณ เวลา 00.45 น.



รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับ Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก ในปี พ.ศ. 2549 (ก) วันที่ 14-16 เมษายน (ข) วันที่ 15-17 ธันวาคม

จากรูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 และ TEC ที่มีความสัมพันธ์กับค่า Dst ในช่วงวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกในปี พ.ศ. 2549 (ก) วันที่ 14-16 เมษายน (ข) วันที่ 15-17 ธันวาคม เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.3 (ก) วันที่เกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกคือ วันที่ 14 เมษายนในช่วงเวลา 17.00 น. Dst มีค่าเท่ากับ -111 nT เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันที่ 14 เมษายน มีค่าเป็นบวกและลบซึ่งมีค่าเป็นบวกสูงในช่วงเวลา 13.15 - 21.15 น. เป็นช่วงเวลาที่เคียงกันกับการเกิดพายุแม่เหล็กโลกและหลังเกิดเหตุการณ์ โดยเป็นบวกสูงสุด 48.24% คิดเป็น 16.74 TECU ณ เวลา 20.45 น. ส่วนในวันที่ 15-16 เมษายน TEC มีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกและลบเล็กน้อย พิจารณา foF2 ในวันที่ 14 เมษายน มีค่าเป็นลบสูงในช่วงเวลา 22.00 - 01.30 น. โดยเป็นลบต่ำสุด -35.46% คิดเป็น 2.83 MHz ณ เวลา 22.45 น. ส่วนในวันที่ 15-16 เมษายน foF2 มีค่าเป็นบวกและลบเล็กน้อย โดยมีค่าเป็นบวกสูงในวันที่ 16 มีค่าเท่ากับ 44% คิดเป็น 2.91 MHz ณ เวลา 01.00 น.

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.3 (ข) วันที่เกิดพายุสนามแม่เหล็กโลกคือ วันที่ 15 ธันวาคม ช่วงเวลา 8.00 – 19.00 น. Dst มีค่าต่ำสุดเท่ากับ -146 nT ณ เวลา 15.00 น. เฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันที่ 15 จะสังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเป็นลบเกือบทั้งวันโดยมีค่าเป็นลบต่ำสุด -32.33% คิดเป็น 11.73 TECU ณ เวลา 10.45 น. ส่วนในวันที่ 16-17 ธันวาคม TEC มีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกและลบเล็กน้อยจากค่ามัธยฐาน พิจารณา foF2 ในวันที่ 15 ธันวาคม มีค่าเป็นลบเกือบทั้งวันโดยเป็นลบต่ำสุด -37.62% คิดเป็น -2.89 MHz ณ เวลา 10.15 น. ในวันที่ 16 foF2 มีค่าเป็นบวกปานกลาง ในช่วงเวลา 7.00 – 20.30 น. และมีค่าเป็นลบในช่วงเวลา 20.45 – 06.45 น. โดยมีค่าเป็นลบต่ำสุด -30.33% คิดเป็น -1.65 MHz ณ เวลา 22.00 น. ในวันที่ 17 ธันวาคม foF2 มีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกและลบเล็กน้อยจากค่ามัธยฐาน

จากรูปที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3 สามารถที่จะสรุปเหตุการณ์วันที่เกิดพายุไอโอโนสเฟียร์ได้ดังนี้ กรณีที่ 1 ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกจะสังเกตได้ว่าเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นบวกหรือเป็นลบสูงจากค่ามัธยฐาน หรือเรียกได้ว่าเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวกหรือแบบลบ กรณีที่ 2 สังเกตได้ว่าเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกหรือลบสูงขึ้นในช่วงก่อนเกิดพายุแม่เหล็กโลกโดย Dst มีค่าประมาณ -30 nT และเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกและลบสูงในช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกและหลังเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว กรณีที่ 3 ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกรุนแรง ซึ่งมี Dst ต่ำกว่า -200 nT เฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นบวกและลบสูงมาก กรณีที่ 4 จะสังเกตได้ว่าเกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวกในช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกมากกว่า เหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์แบบลบโดยสังเกตได้จากเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 ที่มีค่าเป็นบวกสูงกว่าค่ามัธยฐาน กรณีที่ 5 เมื่อนำค่าเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 ที่เป็นบวกสูงสุดและเป็นลบต่ำสุดจากรูปที่ 5.1 , 5.2 และ 5.3 นำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าดังนี้ เฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยของ TEC 37.82 % เฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 43.03% และเมื่อนำ TEC และ foF2 ที่เป็นบวกสูงสุดและเป็นลบต่ำสุดจากค่ามัธยฐานนำมาหาค่าเฉลี่ยได้ดังนี้ TEC มีค่าเท่ากับ 14.93 TECU foF2 มีค่าเท่ากับ 2.55 MHz ซึ่งพอจะสรุปได้ว่าเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC ในวันใดก็ตามมีเฟอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนเป็นบวกหรือลบตั้งแต่ 30% ขึ้นไปหรือมีค่าเป็นบวกสูงกว่าหรือต่ำกว่าจากค่ามัธยฐาน ตั้งแต่ 10 TECU มีโอกาสที่จะเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

เนื่องมาจากผลกระทบของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ส่งผลเสียหายต่อระบบและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อันได้แก่ เกิดการผิดพลาดในเครื่องรับสัญญาณบอกตำแหน่งจากดาวเทียม (GPS) และระบบการเดินเรือในย่านความถี่ VLF , เกิดการสูญเสียของการสื่อสารในย่านความถี่ HF , และเกิดการรบกวนการเชื่อมโยงการสื่อสารดาวเทียมในย่าน UHF (UHF Satellite links) จึงทำให้ต้องมีการศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตามทฤษฎีที่มีผู้วิจัยในต่างประเทศได้ทำการศึกษามาเป็นเวลานาน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษา และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งประกอบด้วยพารามิเตอร์จำนวน 4 ตัว คือ ความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่ได้มาจากการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรม ปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ได้มาจากการวัด TEC ความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 และ กลุ่มความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ที่ได้มาจากการคำนวณ (2.14) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติม ในเรื่องความสัมพันธ์ในวันที่เกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้เปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนความถี่วิกฤตของชั้น F2 และเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการเกิดและการเปลี่ยนแปลง ของเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ ในส่วนของความถี่วิกฤตของชั้น F2 และ ค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัว ตั้งอยู่ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ในแถบละติจูดต่ำ ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเริ่มตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2547 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2549 ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ f_oF2 จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น หรือในช่วงเวลา 06.00 น. จนถึงเวลาประมาณ 10.00 น. จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. และเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากพระอาทิตย์ตกความถี่วิกฤตของชั้น F2 จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ไปจนถึงเวลาประมาณ 05.00 น. และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลพบว่าความถี่วิกฤตในช่วงเวลา 17.00 น. ถึง 19.00 น. จะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูกลาง Equinox และตามปกติหลังจากพระอาทิตย์ตกความถี่วิกฤตจะมีค่าลดลง แต่ในช่วงฤดูกลาง Equinox ความถี่วิกฤตในช่วงเวลาประมาณ 22.00 น. ถึง 02.00 น. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากในช่วงฤดูกลางนี้ จะเกิดความ

แปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มากกว่าในช่วงฤดูกาลอื่นๆ นั่นเอง โดยในปี พ.ศ. 2547 ความแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาดังกล่าวของฤดูกาล Equinox จะมีค่าสูงกว่าในปีอื่นๆ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแบบรายปีพบว่าพารามิเตอร์ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์โดยจากการศึกษาจะพบว่าค่า foF2 ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าในปีอื่นๆ ในทุกช่วงเวลา

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ NmF2 จะแปรผันตามความถี่วิกฤตของชั้น F2 เนื่องจากมีความสัมพันธ์กันดังสมการ (2.13) โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลง NmF2 จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น หรือในช่วงเวลา 06.00 น. จนถึงเวลาประมาณ 10.00 น. จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 11.00 น. ถึง 13.00 น. และเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. ถึง 19.00 น. หลังจากพระอาทิตย์ตกความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 จะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ไปจนถึงเวลาประมาณ 05.00 น. และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลพบว่า NmF2 ในช่วงเวลา 17.00 น. ถึง 19.00 น. จะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูกาล Equinox และตามปกติหลังจากพระอาทิตย์ตก NmF2 จะมีค่าลดลง แต่ในช่วงฤดูกาล Equinox NmF2 ในช่วงเวลาประมาณ 22.00 น. ถึง 02.00 น. มีค่าเพิ่มสูงขึ้นดังคำอธิบายหัวข้อที่ 4.2.3 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแบบรายปีพบว่าพารามิเตอร์ NmF2 มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามค่าปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์โดยจากการศึกษาจะพบว่า NmF2 ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าในปีอื่นๆ ในทุกช่วงเวลา

การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ TEC กล่าวคือปริมาณอิเล็กตรอนรวม จะมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในเวลา 06.00 น. เมื่อเริ่มมีแสงอาทิตย์ที่เป็นพลังงานให้อิเล็กตรอนในชั้นรับพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้แก่ ความเข้มจากรังสี EUV และ X-ray จนเกิดการไอออไนซ์ ของออกซิเจน และ ไนโตรเจน ตามกลไกทางฟิสิกส์ของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนจะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 16.00 น. หลังจากนั้นเมื่อพระอาทิตย์ตกปริมาณอิเล็กตรอนรวมจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ตั้งแต่เวลา 17.00 น. จนถึง 05.00 น. และเมื่อทำการเปรียบเทียบ TEC แบบรายเดือนของปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะเห็นว่า TEC ของแต่ละเดือนในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับ เนื่องจากแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาตามฤดูกาลจะเห็นได้ว่า TEC ในฤดูกาล Equinox ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าฤดูกาล Winter และ ฤดูกาล Summer ตามลำดับ และเมื่อสังเกตปริมาณอิเล็กตรอนรวมในฤดูกาล Equinox , Summer และ Winter ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าฤดูกาลต่างๆ ในปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2549 ตามลำดับเนื่องจากแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงแบบรายปีพบว่าพารามิเตอร์ TEC มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์โดยจากการศึกษาจะพบว่า TEC ในปี พ.ศ. 2547 จะมีค่าสูงกว่าในปีอื่นๆ ในทุกช่วงเวลา

การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ τ ในเวลากลางวันความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์โดยเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ 500 – 600 กิโลเมตร และไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 11.00 น. – 14.00 น. เนื่องจากในช่วงเวลานี้ NmF2 มีค่าต่ำลงดังคำอธิบายในหัวข้อที่ 4.1.1 ส่วน TEC มีความสูงคงที่จึงทำให้ τ มีค่าสูงขึ้นในช่วงเวลานี้และยังมีสาเหตุมาจากค่า solar flux ในเวลานั้นมีค่าเพิ่มขึ้น [11] ในเวลากลางคืน τ โดยเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลาประมาณ 04.00 -05.00 น. τ จะมีค่าสูงที่สุดโดยช่วงเวลานี้เป็นช่วงเวลาก่อนที่พระอาทิตย์จะขึ้นโดยสามารถสรุปได้ว่าเกิดขึ้นเมื่อ NmF2 มีค่าต่ำลงมาก และ TEC ยังคงที่ และจะมีค่าลดลงหลังจากที่พระอาทิตย์ขึ้นไปแล้วในเวลา 06.00 น. เมื่อทำการพิจารณาตามฤดูกาลจะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในฤดูกาล Equinox ในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 มีค่าต่ำสุดและต่ำกว่าฤดูกาล Summer และ Winter จากการสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลา 07.00 น. ถึง 19.00 น. ของทุกฤดูกาลในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าความหนาใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน และจะสังเกตเห็นว่าในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นของปี พ.ศ. 2547 ฤดูกาล Winter จะมีค่าสูงกว่า ฤดูกาล Summer และ ฤดูกาล Equinox ส่วนในปี พ.ศ. 2548 ในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น ฤดูกาล Summer จะมีค่าสูงกว่า ฤดูกาล Winter และ ฤดูกาล Equinox ตามลำดับ เมื่อพิจารณาแบบรายปีจะเห็นได้ว่าค่าความหนาในปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2548 และ ปี พ.ศ. 2547 เนื่องจากในปี พ.ศ. 2549 ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์จะมีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2548 และ พ.ศ. 2547 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากการสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลา 07.00 น. ถึง 19.00 น. ของทุกปีในปี พ.ศ. 2547 ถึง ปี พ.ศ. 2549 จะมีค่าความหนาใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันและจะสังเกตได้ว่าในช่วงเวลา 03.00 – 05.00 น. ในปี พ.ศ. 2548 จะมีค่าต่ำกว่าปี 2547 เนื่องจากค่ามัธยฐานของ TEC แบบรายปี ในปี พ.ศ. 2548 มีค่าต่ำกว่าปี พ.ศ. 2547 ในช่วงเวลาดังกล่าวแต่ค่ามัธยฐานของ NmF2 แบบรายปี ช่วงเวลา 03.00 – 05.00 น. ในปี พ.ศ. 2548 มีค่าสูงกว่าปี พ.ศ. 2547 เมื่อนำไปหาค่าอัตราส่วนระหว่าง TEC กับ NmF2 จึงได้ผลดังที่กล่าวมาข้างต้น

การวิเคราะห์การเกิดเหตุการณ์พายุไอโอโนสเฟียร์ สามารถที่จะสรุปได้ดังนี้ ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกจะสังเกตได้ว่า เปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นบวกหรือเป็นลบสูงจากค่ามัธยฐานหรือเรียกได้ว่าเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวกหรือแบบลบ สังเกตได้ว่าเปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเป็นบวกหรือลบสูงขึ้นในช่วงก่อนเกิดพายุแม่เหล็กโลกโดย Dst มีค่าประมาณ -30 nT ในวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกรุนแรงซึ่งมีค่า Dst ต่ำกว่า -100 nT เปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นบวกและลบ สูงกว่า 30% จากค่ามัธยฐานรายเดือน สังเกตได้ว่าเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์แบบบวกในช่วงเวลาที่เกิดพายุแม่เหล็กโลก มากกว่าพายุไอโอโนสเฟียร์แบบลบ เมื่อนำเปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนของ TEC และ foF2 ที่เป็นบวกสูงสุดและเป็นลบต่ำสุดจากผลการ

วิเคราะห์ทั้งหมด นำมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ค่าดังนี้ เปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ยของ TEC เท่ากับ 37.82 % เปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนของ foF2 เท่ากับ 43.03% ซึ่งพอจะสรุปได้ว่า TEC ในวันนี้ก็ตาม มีค่าเปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนเป็นบวกหรือลบตั้งแต่ 30% ขึ้นไป มีโอกาสที่จะเกิดพายุไอโอโนสเฟียร์

ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย ในอนาคตข้างหน้าควรที่จะเก็บข้อมูลพารามิเตอร์ดังกล่าวให้ครบใน 1 รอบวัฏจักร หรือ 11 ปี เพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง (model) ในเชิงทฤษฎี หรือเชิงปฏิบัติ เพื่อใช้ในการทำนายค่าหรือเหตุการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในปัจจุบันหรือเหตุการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต และสามารถที่จะนำลักษณะการเปลี่ยนของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปออกแบบและแก้ไขระบบและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ นอกจากนี้ควรทำการเก็บวัดข้อมูลจากหลายๆ สถานีเพื่อทำการเปรียบเทียบถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังกล่าว และศึกษาถึงกลไกการเคลื่อนตัวของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Jayachandan, T. N. Krishnankutty and T. L. Gulyaeva, "Climatology of ionospheric slab thickness," *Ann. Geophys.*, vol. 22, pp. 25-33, 2004.
- [2] Y. J. Chuo, "The variation of ionospheric slab thickness over equatorial ionization area crest region," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 69, pp. 947-954, 2007.
- [3] S. Jin , J. Cho and J. Park, "Ionospheric slab thickness and its seasonal variations observed by GPS," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 69, pp. 1864-1870, 2007.
- [4] G. Ma and T. Maruyama, "Ionospheric slab thickness over Kokubunji during solar Maximum," *Ann. Geophys.*, 2005.
- [5] G. L. Goodwin, J.H. Silby, K. J. W. Lynn, A. M. Breed and E. A. Essex, "GPS satellite measurements: ionospheric slab thickness and total electron content," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 57, pp. 1723-1732, 1995.
- [6] T. L. Gulyaeva, B. Jayachandran, T. N. Krishnankutty, "Latitudinal variation of ionospheric slabthickness," *Adv. Space Res.*, vol. 33, pp. 862-865, 2004.
- [7] T. Gulyaeva, I. Stanislawka, "Night-day imprints of ionospheric slab thickness during geomagnetic storm," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol.67, pp. 1307-1314, 2005.
- [8] M.C. Kelly. **The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Electrodynamics.** London : ACADEMIC PRESS, INC. 1989.
- [9] M.P.M Hall, L.W. Barclay and M.T. Hewitt. **Propagation of Radiowaves.** London : Short Run Press Ltd. 1996.
- [10] Geocitys "ชั้นบรรยากาศโลก" [Online]. Available: http://www.geocities.com/ros_loha/work2.doc
- [11] R. E. Collin. **Antenna and Radio Wave Propagation.** Mc-Graw-Hill. 1985.
- [12] Tadanori Ondoh and Katsuhide Marubashi eds. **Science of Space Environment.** Tokyo : Ohmsha, Ltd. 2000.
- [13] J. E. Allnutt. **Satellite to ground radio wave propagation theory, practice and system impact at frequencies above 1 GHz.** London : Peter Peregrinus. 1989.
- [14] "เรื่องจริงของพายุสุริยะ" [Online]. Available : <http://www.kbyala.ac.th/digital-library/star/science/slrstorm.htm>

- [15] NOAA/NWS Space Weather Prediction Center "Solar Cycle 24" [Online]. Available :
<http://www.swpc.noaa.gov/Solar Cycle/SC24/index.html>
- [16] "Electrical Engineering Training Series" [Online]. Available :
<http://www.tpub.com/neets/book10/40e.htm>
- [17] K. Bibl, "Evaluation of the ionosonde," *Annali Di Geofisica.*, vol. 41, No. 5-6, pp. 667-680, November-December 1998.
- [18] G. Ma and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan," *Ann. Geophys.*, vol. 21, pp. 2083-2093, 2003.
- [19] G. Blewitt, "An automatic editing algorithm for GPS data," *Geophysical Research Letters*, vol. 17, pp. 199-202, 1990.
- [20] Solar Influences Data Analysis Center "Sunspot Index Graphics" [Online]. Available :
<http://sidc.oma.be/html/wolfjmmms.html>
- [21] H. Minakoshi, and I. Nishimuta, "Ionospheric electron content and equivalent slab thickness at lower mid-latitudes in the Japanese zone," *Proc., IBSS, University of Wales, U.K.*, 144, 1994.
- [22] G. O. Walker, and S. D. ting, "Electron content and other related measurements for low-latitude station obtained at sunspot maximum using geostationary satellite," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 34, 283-294, 1972.
- [23] P. B. Rao, B. Jayachadran, and N. Balan, "Low latitude TEC and Np variations during the solar cycles of 20 and 21, in: Investigation of ionosphere by means of Beacon satellite measurements edited by Cao Chong," *Int. Beacon Satellite symposium, Beijing, China*, pp.241-249, 1988.
- [24] นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์. "การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟคเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณละติจูดต่ำ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- [25] รุ่งชัย อัดตวิริยะสุวร. "การศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่หุ่มพรไกล์ บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549

- [26] N. Wakai, H. Ohya and T. Koizumi. **MANUAL OF IONOGRAM SCALING**. Third Version. Communications Research laboratory. Tokyo, Japan, 1987.
- [27] M. Nakamura. **Quick Reference of Manual Scaling for SPECIAL scaling from Manual of Ionogram Scaling**. Communications Research laboratory. Tokyo, Japan, 2003.
- [28] SIDC “Solar Influences Data Analysis Center” [Online]. Available : <http://www.sidc.be, Feb 1, 2006>
- [29] ดาราศาสตร์เพื่อไทย “Sunspot Number” [Online]. Available : <http://www.prc.ac.th/Astronomy/sunspot.htm>
- [30] K. Davies, and X. M. Lui, “Ionosphere slab thickness in middle and low-latitudes”, **Radio Sci.**, vol.26, pp. 997-1005, 1991.
- [31] World Data Center for Geomagnetism, Kyoto “Provisional Dst index” [Online]. Available : http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html
- [32] M. Sugiura, “Hourly values of equatorial Dst for IGY,” **Annals of the International Geophysical Year**, vol. 35, pp. 945-948, 1964.
- [33] Space Physics Oulu “Geomagnetic storms” [Online]. Available : <http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT/storms.html>
- [34] M. J. Buonsanto, “Ionospheric storms – a review,” **Space Science Reviews**, vol. 88, pp. 563-601, 1999.
- [35] N. Matuura, “Theoretical models of ionospheric storms,” **Space Science Reviews**, vol. 13, pp. 124-189, 1972.
- [36] K. K. Barbatsi and L. R. Cander, “Studying the ionospheric storms over mediterranean area for application to the HF propagation predictions,” **IEEE Seventh International Conference on Antennas and Propagation** , vol. 2, pp. 898-901, 1991.
- [37] I. I. Shagimuratov, A. Krankowski, L. W. Baran, J. Cisak and G. Yakimova, “Storm-time structure and dynamic of the ionosphere obtained from GPS observations,” **Artificial Satellites**, vol. 39, pp. 28-31, 2004.
- [38] G. A. Mansilla and M. Mosert, “Two cases of ionospheric storms at the equatorial anomaly,” **Adv. Space Res.**, vol. 39, pp. 668-673, 2007.
- [39] T. Maruyama, M. Kawamura, S. Saito, K. Nozaki, H. Kato, N. Hammakorn, T. Boonchuk, T. Komolmis and C. Ha Duyen, “Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics

- studies with ionosonde chain in Southeast Asia," *Ann. Geophys.*, vol. 25, pp. 1569-1577, 2007.
- [40] R. V. Bhonsle, A. V. Da Rosa, and O. K. Garriott, "Measurement of total electron content and equivalent slab thickness of the mid latitude ionosphere," *Radio Science*, vol. 7, pp. 929, 1965.
- [41] L. Kersley, and H. Hajeb Hosseinieh, "Dependence of ionospheric slabthickness on geomagnetic activity," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 38, pp. 1357-1360, 1976.
- [42] Y. N. Huang, "Some result of ionospheric slab thickness observation at Lunping," *J. Geophys. Res.*, vol. 88, pp. 5517-5522, 1983.
- [43] P. K. Bhuyan, and T. R. Tyagi, "Annual and semiannual periodicities in IEC at low-latitudes Indian," *J. Radio Space Phys.*, vol. 14, pp. 61, 1985.
- [44] T. L. Gulyaeva, "TEC residual slab thickness between bottomside and topside ionosphere," *Acta. Geod. Geoph. Hung.*, vol. 32, pp. 355-363, 1997.
- [45] P. K. Bhuyan, S. Lakha and T. R. Tyagi, "Equivalent slab thickness of the ionosphere over 26° N through the ascending half of a solar cycle," *Ann. Geophys.*, vol. 4, pp. 131-136, 1986.
- [46] J. E. Titheridge, "The slab thickness of the mid-latitude ionosphere," *Planet. Space Sci.*, vol. 21, pp. 1775-1793,
- [47] M. J. Buonsanto, M. Mendillo, and J. A. Klobuchar, "The ionosphere at L = 4: average behaviour and the response to geomagnetic storms," *Ann. Geophys.* 35, pp. 15-26, 1979.
- [48] L. F. McNamara, and D. H. Smith, "TEC of ionosphere at 310S ," *J. Atmos. Terr. Phys.*, vol. 44, pp. 227, 1974.
- [49] A. L. Barghausen, J. W. Finney, L. L. Proctor, and L. D. Schultz, "Predicting long-term operational parameters of high frequency sky-wave telecommunication systems," *ESSA Tech. Rep., ERL 110-ITS. 78*, 1969.
- [50] D. N. Aderson, "A theoretical study of ionospheric F-region equatorial anomaly II results in the American and Asian sectors," *Planet. Space Sci.*, vol. 21, pp. 409-419, 1973.
- [51] S. K. Llewellyn, and R. B. Bent, "Documentation and description of the Bent ionospheric model," *AFCRL Tech. Rep., AFCRL-TR-73-0657*, 1973.
- [52] R.B. Bent, S. K. Llewellyn, G. Nesterczuk, and P. E. Schmid, "The development of highly successful worldwide empirical ionospheric model its use in certain areas of space

- communications and worldwide total electron content investigations, in: Goodman, J. (Ed.), *Effect of the ionosphere on space systems and communications*, Springfield, pp. 13-28, 1976.
- [53] D. N. Anderson, M. Mendillo, and B. A. Hertniter, "Semiempirical low latitude ionospheric model," *Radio Sci.*, vol. 21, pp. 421, 1973.
- [54] D. Bilitza, "International reference ionosphere: recent developments," *Radio Sci.*, vol. 21, pp. 343-346, 1986.
- [55] D. Bilitza, "International reference ionosphere," *Rep. NSSDC/WDC-R&S 90-22, Natl. Space Sci. Data Cent./World Data for Rockets and Satellites, Greenbelt, MD*, 1990.
- [56] D. Bilitza, "International reference ionosphere 2000," *Radio Sci.*, vol. 36, pp. 261-275, 2001.
- [57] T. J. Fuller-Rowell, E. A. Araujo-Pradere, and M. V. Codrescu, "An empirical ionospheric storm-time correction model," *Adv. Space Res.*, vol. 25, pp.139-146, 2000.
- [58] T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, and E. A. Araujo-Pradere, "Capturing the storm-time ionospheric response in an empirical model," *Space Weather AGU Geophys.*, vol. 125, pp. 393-401, 2001.
- [59] E. A. Araujo-Pradere, T. J. Fuller-Rowell, and M. V. Codrescu, "STORM: an empirical storm-time ionospheric correction model, 1, Model description," *Radio Sci.*, vol.37, pp. 1-12, 2002a.
- [60] E. A. Araujo-Pradere, T. J. Fuller-Rowell, and M. V. Codrescu, "STORM: an empirical storm-time ionospheric correction model, 2, validation," *Radio Sci.*, vol. 37, pp. 1-14, 2002b.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.**ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่**

1. P. Suvannasang, N. Wichaipanich, N. Leelaruji, M. Ishii and P. Supnithi **“The Variation of Ionospheric Slab Thickness at Thailand Equatorial Latitude Station,”** The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2008), pp. 877-880, 2008.

ประวัติผู้เขียน

ผู้เขียน	นายภูสิทธิ์ สุวรรณแสง
วัน เดือน ปีเกิด	19 มีนาคม พ.ศ. 2524
สถานที่เกิด	จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิชาเอก วิศวกรรมไฟฟ้า – โทรคมนาคม
สถานศึกษา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
พ.ศ.	2547

งานวิจัยที่สนใจ

การศึกษาความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และพายุไอโอโนสเฟียร์

สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารดาวเทียม (Satellite Communication Lab.)

สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. P. Suvannasang, N. Wichaipanich, N. Leelaruji, M. Ishii and P. Supnithi "The Variation of Ionospheric Slab Thickness at Thailand Equatorial Latitude Station," The 23rd International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2008), pp. 877-880, 2008