

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศ F2 ที่มีผลต่อสุริยุปราคา
เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

VARIATION OF IONOSPHERE PARAMETER IN F2 LAYER EFFECTS
TO SOLAR ECLIPSE WITH IRI-2016 MODEL
OVER SOUTHEAST ASIA

นิมิตร อินทร์สกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศ F2 ที่มีผลต่อสุริยุปราคา
เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

นิมิตร อินทร์สกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

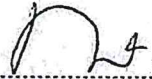
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศ F2 ที่มีผลต่อ
 สุริยุปราคาเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
 Variation of Ionosphere Parameter in F2-Layer Effects to Solar Eclipse
 with IRI-2016 Model over Southeast Asia

ชื่อ - นามสกุล นายนิมิตร อินทร์สกุล
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.
ปีการศึกษา 2563

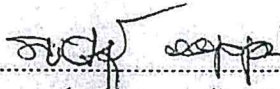
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ, D.Eng.)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.)



..... กรรมการ
(อาจารย์วิเชียร อุบแก้ว, Ph.D.)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศ F2 ที่มีผลต่อสุริยุปราคา เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
ชื่อ – นามสกุล	นายนิมิตร อินทร์สกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยการแพร่กระจายในชั้น F2 (M(3000)F2) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F2 (NmF2) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้จริง เปรียบเทียบกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2016 นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาที่ส่งผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ NmF2 ในบริเวณจุดสังเกต ณ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ตัวแปร M(3000)F2 และ NmF2 ถูกเก็บวัดจากสถานีไอโอโนซอนด์จำนวน 3 สถานี คือสถานี เชียงใหม่ สถานีชุมพร ในประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ในประเทศอินโดนีเซีย สถานีทั้ง 3 ตั้งอยู่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กที่มีการไอออไนเซชันอย่างผิดปกติ ค่าทุก ๆ ชั่วโมงของตัวแปร M(3000)F2 และ NmF2 ในช่วงตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ถูกนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายชั่วโมง แบบรายวัน แบบรายฤดูกาลและแบบรายปี ตามลำดับ ค่าเปอร์เซ็นต์เบี่ยงเบน (%PD) ถูกใช้วิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับแบบจำลอง IRI-2016 ขณะที่การอ้างอิงขอบเขตบนและขอบเขตล่างถูกใช้เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในช่วงเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา

ผลที่ได้พบว่า 1) การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร M(3000)F2 ที่วัดได้จากทั้ง 3 สถานีมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลอง IRI-2016 กล่าวคือมีค่าลดลงช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (ประมาณ 05.00-06.00 น.) จนมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 11.00-13.00 น. หลังจากนั้นค่าจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 03.00-04.00 น. โดยปกติค่า M(3000)F2 มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 2.5 ถึง 3.5 เมกะเฮิรตซ์ อย่างไรก็ตามแบบจำลอง IRI ทำนายค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงในช่วงเวลากลางวันและต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงในช่วงเวลากลางคืน ค่า %PD อยู่ในช่วง -28% ถึง 19% สำหรับสถานีเชียงใหม่ -30% ถึง 13% สำหรับชุมพร และ -23% ถึง 20% สำหรับโกโตตาบัง เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานีทั้ง 3 พบว่าสถานีเชียงใหม่มีค่าสูงที่สุด และสถานีโกโตตาบังมีค่าต่ำที่สุด (2) ผลของตัวแปร NmF2 ที่เก็บได้จริงและแบบจำลอง IRI-2016 แสดงการเปลี่ยนแปลงเหมือนกันทั้ง 3 สถานี กล่าวคือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงกลางวัน จนมีค่าสูงสุดในช่วงก่อนพระอาทิตย์ตก (ประมาณ 17.00-18.00 น.) จากนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำที่สุดในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (ประมาณ 05.00-06.00 น.) โดยทั่วไป NmF2 มีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงประมาณ 0.06×10^{12} ถึง 2.4×10^{12} อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร นอกจากนี้แบบจำลอง IRI ทำนายค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงในช่วงเวลากลางวันและต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงในช่วงเวลากลางคืน ค่า %PD อยู่ในช่วง

-20% ถึง 10% สำหรับสถานีเชียงใหม่ -25% ถึง 5% สำหรับชุมพร และ -15% ถึง 5% สำหรับโคโคตาบัง เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่างสถานีทั้ง 3 พบว่าที่สถานีเชียงใหม่มีค่าสูงสุด ในขณะที่สถานีชุมพรมีค่าต่ำสุด (3) การเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา พบว่ามีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยรายเดือน นอกจากนี้การลดลงของ NmF2 แปรผันตรงกับค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดของวันที่เกิดสุริยุปราคาในแต่ละสถานี อีกทั้งการเกิดพายุแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็คตรอนในชั้นบรรยากาศอีกด้วย การศึกษาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้คงมีส่วนช่วยในการพัฒนาแบบจำลอง IRI ในอนาคต

คำสำคัญ: ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ไอโอโนซอนด์ แบบจำลอง ปรากฏการณ์สุริยุปราคา

Thesis Title	Variation of Ionosphere Parameter in F2 Layer Effects to Solar Eclipse with IRI-2016 Model over Southeast Asia
Name-Surname	Mr. Nimit In-sakun
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Noraset Wichaipanich, D.Eng.
Academic Year	2020

ABSTRACT

This thesis presents the variations of ionospheric propagation factor $M(3000)F_2$ and the ionospheric F2 layer peak of electron density (NmF_2) that was actually measured comparing with predicted value through IRI-2016 model. Besides, the occurrence of the solar eclipse affecting the NmF_2 parameter at the equatorial ionization anomaly (EIA) over Southeast Asia region was analyzed.

The $M(3000)F_2$ and NmF_2 parameters were collected and measured from 3 ionosonde stations including Chiang Mai Station and Chumphon Station in Thailand, and Kototabang Station in Indonesia. These three stations are located at the equatorial ionization anomaly (EIA) where the irregular ionization occurs. The hourly values of $M(3000)F_2$ and NmF_2 parameters during the periods from January 2010 to December 2018 were used to analyze the hourly, daily, seasonally, and yearly, variations respectively. The percent deviation (%PD) of both parameters was used to investigate the difference between the actual measured data and the IRI-2016 model predictions. Meanwhile, the upper bound and lower bound references were used to analyze the variations during the occurrence of solar eclipse.

The results showed that: 1) the variations of $M(3000)F_2$ parameter measured from 3 ionosonde stations were similar to the IRI-2016 model, that is decreasing in values before sunrise (around 5.00 am-6.00 am, local time) and reaching the lowest values around 11.00 am-1.00 pm, local time. After that, the values gradually increased and reached the maximum values around 3.00 am-4.00 am, local time. In general, the $M(3000)F_2$ values change from 2.5 MHz to 3.5 MHz. However, the IRI model predicted the observed values higher than the actual measured values during the daytime and lower than the actual measured values during the nighttime. The %PD varied from -28% to 19% for Chiang Mai Station, -30% to 13% for Chumphon Station, and -23% to

20% for Kototabang Station. When comparing the variations among these 3 stations, the results revealed that the highest values occurred at Chiang Mai Station while Kototabang Station recorded the lowest values. 2) The results of the actual measured NmF2 and the ones predicted by the IRI-2016 model showed similar variations for all stations. They increased during the daytime until reaching the maximum values before sunset hours (around 5.00 pm-6.00 pm, local time). Then, they decreased during nighttime until reaching the lowest levels during pre-sunrise hours (around 5.00 am-6.00 am, local time). In general, the NmF2 values change from 0.06×10^{12} to 2.4×10^{12} e/m³. Furthermore, the IRI model predicted the NmF2 values higher than the actual measured ones during the daytime and predicted the NmF2 values lower than the actual values during the nighttime. The %PD of NmF2 values ranged from -20% to 10% for Chiang Mai Station, -25% to 5% for Chumphon Station and -15% to 5% for Kototabang Station. When comparing the changes among these 3 stations, the results showed that Chiang Mai Station recorded the highest values while Chumphon Station showed the lowest ones. 3) The variations in NmF2 during the solar eclipse period decreased significantly when compared with the monthly median. It also showed that the decrease of NmF2 changed in the same direction of the highest percentage obscuration on the solar eclipse days at each station. In addition, the magnetic storms and the magnetic field vibrations also had an impact on the variations of the ionospheric electron density. The results of this thesis would be beneficial to the development of the IRI model in the future.

Keywords: Ionosphere, Ionosonde, IRI-model, solar eclipse

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าให้คำที่ปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เคนพันค้อ ประธานกรรมการสอบ และกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ และ ดร.วิเชียร อุปแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณาให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติ (NICT) ประเทศญี่ปุ่นและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย สำหรับอุปกรณ์และการสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ผ่านโครงการของ SEALION

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องและคณะครูบาอาจารย์ทุกท่านในภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุน เป็นกำลังใจ และให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้มีข้อบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นิมิตร อินทร์สกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(13)
สารบัญรูป.....	(14)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(22)
บทที่ 1 บทนำ.....	23
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	23
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	24
1.3 ขอบเขตการทำวิจัย.....	24
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	24
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	25
2.1 ลักษณะของชั้นบรรยากาศ.....	25
2.1.1 แบ่งชั้นบรรยากาศตามลักษณะและระดับความสูง.....	25
2.1.2 แบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์.....	27
2.1.3 แบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเป็นเกณฑ์.....	27
2.1.4 แบ่งชั้นบรรยากาศทางอุตุนิยมวิทยา.....	28
2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	28
2.3 เทคนิคไอโอโนซอนด์ (Ionosonde)	31
2.3.1 ไอโอโนแกรม.....	33
2.3.2 สถานีไอโอโนซอนด์.....	34
2.4 แบบจำลอง International Reference Ionosphere (IRI)	36
2.5 สุริยุปราคา (Solar Eclipse)	38
2.5.1 สุริยุปราคาเต็มดวง (Total eclipse)	39
2.5.2 สุริยุปราคาบางส่วน (Partial eclipse)	39
2.5.3 สุริยุปราคาวงแหวน (Annular eclipse)	39
2.5.4 สุริยุปราคาผสม (Hybrid eclipse)	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สุริยุปราคาที่สามารถมองเห็นได้ในประเทศไทย.....	40
2.6.1 สุริยุปราคาวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550.....	40
2.6.2 สุริยุปราคาวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552.....	41
2.5.3 สุริยุปราคาวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553.....	42
2.5.4 สุริยุปราคาวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559.....	43
บทที่ 3 วิธีการศึกษาผลการวิจัย.....	45
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย.....	45
3.1.1 เครื่องส่งและเครื่องรับ.....	45
3.1.2 สายอากาศที่ใช้ใช้งาน.....	46
3.1.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาพไอโอโนแกรม.....	46
3.2 สถานที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	47
3.2.1 สถานีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย.....	47
3.2.2 สถานีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย.....	47
3.2.3 สถานีสถาบันการบินและอวกาศแห่งชาติ (LAPAN) โกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย.....	47
3.3 วิธีการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรม.....	48
3.3.1 การใช้โปรแกรม Special Scaling.....	48
3.3.2 ภาพจำลองการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	51
3.3.2.1 การเก็บค่าพารามิเตอร์ foF2.....	51
3.3.2.2 การเก็บค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2.....	60
3.3.2.3 การเก็บค่าพารามิเตอร์ NmF2.....	65
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตร และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016.....	66
4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 สถานีเชียงใหม่.....	67
4.1.1.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายวัน.....	67
4.1.1.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายฤดูกาล.....	68
4.1.1.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี.....	71
4.1.1.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot.....	73
4.1.2 สถานีชุมพร.....	76
4.1.2.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายวัน.....	76
4.1.2.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายฤดูกาล.....	77
4.1.2.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี.....	80
4.1.2.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot.....	82
4.1.3 สถานีโกโตตาบั้ง.....	84
4.1.3.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายวัน.....	84
4.1.3.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายฤดูกาล.....	85
4.1.3.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี.....	88
4.1.3.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot.....	90

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	92
4.2.1 สถานีเชียงใหม่.....	92
4.2.1.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายวัน.....	92
4.2.1.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายฤดูกาล.....	93
4.2.1.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายปี.....	96
4.2.1.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot.....	98
4.2.2 สถานีชุมพร.....	100
4.2.2.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายวัน.....	100
4.2.2.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายฤดูกาล.....	102
4.2.2.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายปี.....	104
4.2.2.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot.....	106
4.2.3 สถานีโกโตต้าง.....	109
4.2.3.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายวัน.....	109
4.2.3.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายฤดูกาล.....	110
4.2.3.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายปี.....	113
4.2.3.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot.....	115

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 สรุป.....	117
บทที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (NmF2) เทียบกับการเกิดสุริยุปราคา.....	120
5.1 ข้อมูลและวิธีการวิเคราะห์.....	120
5.2 ผลลัพธ์และการอภิปราย.....	121
5.2.1 สุริยุปราคาวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559.....	121
5.2.2 สุริยุปราคาวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553.....	125
5.2.3 สุริยุปราคาวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552.....	129
5.2.4 สุริยุปราคาวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550.....	133
5.3 สรุป.....	137
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	138
บรรณานุกรม.....	140
ภาคผนวก.....	144
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	123
ประวัติผู้เขียน.....	155

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	สถานีไอโอโนซอนด์และตำแหน่งที่ตั้งบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....36
ตารางที่ 2.2	คณะกรรมการอำนวยการของแบบจำลอง IRI37
ตารางที่ 2.3	สมาชิกตามประเทศของแบบจำลอง IRI37
ตารางที่ 4.1	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานี เชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....71
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....73
ตารางที่ 4.3	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....79
ตารางที่ 4.4	ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....81
ตารางที่ 4.5	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานี โกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....87
ตารางที่ 4.6	ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานี โกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....89
ตารางที่ 4.7	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานี เชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....95
ตารางที่ 4.8	ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....97
ตารางที่ 4.9	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....104
ตารางที่ 4.10	ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....106
ตารางที่ 4.11	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานี โกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....112
ตารางที่ 4.12	ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....114
ตารางที่ 5.1	ค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดของวันที่เกิดสุริยุปราคาของแต่ละสถานี.....120

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ระยะความสูงของชั้นบรรยากาศกับโลก.....25
รูปที่ 2.2	การแบ่งชั้นบรรยากาศตามลักษณะและระดับความสูง.....26
รูปที่ 2.3	การแบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์.....27
รูปที่ 2.4	การแบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อากาศเป็นเกณฑ์.....28
รูปที่ 2.5	การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ MUF.....29
รูปที่ 2.6	พฤติกรรมของคลื่นเมื่อมีมุมตกกระทบต่างกัน.....30
รูปที่ 2.7	ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและเวลากลางคืน.....31
รูปที่ 2.8	แบบจำลองการส่งคลื่นสะท้อนกลับ.....32
รูปที่ 2.9	การจำลองส่งคลื่นไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ของเทคนิคไอโอโนซอนด์.....32
รูปที่ 2.10	การส่งสัญญาณในอุดมคติ.....33
รูปที่ 2.11	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่อ่านได้จากภาพไอโอโนแกรม.....34
รูปที่ 2.12	บริเวณที่ติดตั้งสถานี Ionosonde ทั่วโลก.....35
รูปที่ 2.13	สถานีไอโอโนซอนด์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....35
รูปที่ 2.14	การเกิดสุริยุปราคา.....39
รูปที่ 2.15	ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ.2550.....41
รูปที่ 2.16	ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ.2552.....42
รูปที่ 2.17	ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 15 มกราคม พ.ศ.2553.....43
รูปที่ 2.18	ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ.2559.....44
รูปที่ 3.1	เครื่องส่งและเครื่องรับเป็นรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar.....45
รูปที่ 3.2	สายอากาศชนิดโพลเด็คไดโพล.....46
รูปที่ 3.3	สายอากาศที่สถานีชุมพร ประเทศไทย.....46
รูปที่ 3.4	คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาพไอโอโนแกรม.....47
รูปที่ 3.5	แผนที่โลกที่ทำการติดตั้งบริเวณ EIA.....48
รูปที่ 3.6	หน้าแรกของโปรแกรม Special Scaling.....48
รูปที่ 3.7	การเลือกค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม Special Scaling.....49
รูปที่ 3.8	การเลือกวันที่ เดือน ปี และเวลาจากโปรแกรม Special Scaling.....49
รูปที่ 3.9	ตัวอย่างการวัดค่าพารามิเตอร์ foF2 จากโปรแกรม Special Scaling.....50
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 จากโปรแกรม Special Scaling.....50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 ภาพจำลองการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากไอโอโนแกรม.....	51
รูปที่ 3.12 ค่าความถี่ของชั้น F2 ไม่สามารถอ่านค่าได้เนื่องจากการคลุมด้วยค่าความถี่ของชั้น Es.....	52
รูปที่ 3.13 การแพร่กระจายของค่าความถี่ของชั้น F2 เนื่องจากการคลุมด้วยค่าความถี่ของชั้น Es.....	52
รูปที่ 3.14 การจางหายของค่าความถี่ส่วนล่างเนื่องจากการดูดซึม.....	53
รูปที่ 3.15 การจางหายของค่าความถี่ส่วนบนเนื่องจากความผิดปกติของสถานีไอโอโนซอนด์.....	53
รูปที่ 3.16 ไม่มีการบันทึกค่าความถี่ foF2 เนื่องจากเกิดการรบกวนของพายุแม่เหล็ก.....	54
รูปที่ 3.17 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ foF1 มาก.....	54
รูปที่ 3.18 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 สามารถอ่านค่าได้อย่างชัดเจน.....	55
รูปที่ 3.19 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดการผิดปกติหรือมีรอยหยักชั่วคราว.....	55
รูปที่ 3.20 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดการลดทอน (Attenuation).....	56
รูปที่ 3.21 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดสัญญาณรบกวน (Interference).....	56
รูปที่ 3.22 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดสัญญาณรบกวนของสัญญาณส่วนบน.....	57
รูปที่ 3.23 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 มีลักษณะเป็นง่าม (Fork).....	57
รูปที่ 3.24 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 มีขนาดรูปร่างผิดปกติสะท้อนจากทิศทางแนวเฉียง.....	58
รูปที่ 3.25 ค่าของความถี่วิกฤตชั้น F1 และ F2 มีความผิดปกติหรือเกิดรอยหยัก.....	58
รูปที่ 3.26 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 มีค่าความสูงเกินขีดจำกัดของรูปไอโอโนแกรม.....	59
รูปที่ 3.27 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 มีความถี่ Z-mode เกิดขึ้น.....	59
รูปที่ 3.28 ภาพจำลองของ MUF.....	60
รูปที่ 3.29 ภาพจำลองการใช้งานของ MUF.....	61
รูปที่ 3.30 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (1).....	61
รูปที่ 3.31 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (2).....	62
รูปที่ 3.32 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (3).....	62
รูปที่ 3.33 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (4).....	63
รูปที่ 3.34 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (5).....	63
รูปที่ 3.35 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (6).....	64
รูปที่ 3.36 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (7).....	64
รูปที่ 3.37 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (8).....	65

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	67
รูปที่ 4.2 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	68
รูปที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	69
รูปที่ 4.4 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	70
รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	72
รูปที่ 4.6 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	72
รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....	75
รูปที่ 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2559.....	76
รูปที่ 4.9 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	77

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	78
รูปที่ 4.11 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	78
รูปที่ 4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	80
รูปที่ 4.13 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง ค่า $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	80
รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซนต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....	83
รูปที่ 4.15 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีโกโตต้าง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	84
รูปที่ 4.16 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีโกโตต้าง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	85
รูปที่ 4.17 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	85
รูปที่ 4.18 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	86
รูปที่ 4.19 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	88

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F_{2Obs}$ กับ $M(3000)F_{2IRI}$ ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	88
รูปที่ 4.21 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $M(3000)F_{2IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีโกโตต้าง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....	91
รูปที่ 4.22 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	93
รูปที่ 4.23 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	93
รูปที่ 4.24 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	94
รูปที่ 4.25 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	95
รูปที่ 4.26 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	96
รูปที่ 4.27 เปรอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	97
รูปที่ 4.28 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF_{2Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า NmF_{2IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....	99
รูปที่ 4.29 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF_2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF_{2Obs} กับ NmF_{2IRI} แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	101

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.30	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	101
รูปที่ 4.31	ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	102
รูปที่ 4.32	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	103
รูปที่ 4.33	ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	105
รูปที่ 4.34	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	105
รูปที่ 4.35	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF2 _{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า NmF2 _{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วน เบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานี ชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....	107
รูปที่ 4.36	ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} แบบรายวัน ของสถานีโกโตตาบัง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	109
รูปที่ 4.37	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} แบบรายวัน ของสถานีโกโตตาบัง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559.....	109
รูปที่ 4.38	ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	111
รูปที่ 4.39	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล.....	111
รูปที่ 4.40	ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	113
รูปที่ 4.41	เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่าง ค่า NmF2 _{Obs} กับ NmF2 _{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี.....	114

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.42	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $NmF2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561.....	116
รูปที่ 4.43	การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบ 3 สถานี.....	117
รูปที่ 4.44	การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $NmF2$ เปรียบเทียบ 3 สถานี.....	118
รูปที่ 5.1	ค่าการเปลี่ยนแปลงของ $NmF2$ ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 4 มีนาคม ถึง 14 มีนาคม 2559 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 9 มีนาคม 2559.....	122
รูปที่ 5.2	ค่าการเปลี่ยนแปลงของ $NmF2$ ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 9 มีนาคม 2559 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง).....	123
รูปที่ 5.3	ความแตกต่างของ $NmF2$ ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง).....	124
รูปที่ 5.4	ค่าการเปลี่ยนแปลงของ $NmF2$ ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 10 มกราคม ถึง 20 มกราคม 2553 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 15 มกราคม 2553.....	126
รูปที่ 5.5	ค่าการเปลี่ยนแปลงของ $NmF2$ ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 15 มกราคม 2553 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง).....	127
รูปที่ 5.6	ความแตกต่างของ $NmF2$ ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง).....	128
รูปที่ 5.7	ค่าการเปลี่ยนแปลงของ $NmF2$ ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 17 กรกฎาคม ถึง 27 กรกฎาคม 2552 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 22 กรกฎาคม 2552.....	130
รูปที่ 5.8	ค่าการเปลี่ยนแปลงของ $NmF2$ ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 22 กรกฎาคม 2552 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง).....	131

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.9 ความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง).....	132
รูปที่ 5.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 14 มีนาคม ถึง 24 มีนาคม 2550 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 19 มีนาคม 2550.....	134
รูปที่ 5.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 19 มีนาคม 2550 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง)	135
รูปที่ 5.12 ความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง).....	136

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CCIR	The International Radio Consultative Committee
CMU	Chiang Mai
COSPAR	Committee On SPACe Research
CPN	Chumphon
EIA	Equatorial Ionization Anomaly
foE	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น E
foEs	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น Es
foF1	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F1
foF2	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F2
fxF1	ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F1
fxF2	ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F2
h'E	ความสูงของชั้น E
h'F1	ความสูงของชั้น F1
h'F2	ความสูงของชั้น F2
HF	High Frequency
IRI	The International Reference Ionosphere
KTB	Kototabang
LB	ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง
LF	Low Frequency
M(3000)F2	ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตรของชั้น F2
MF	Medium Frequency
MUF(3000)F2	Maximum Usable Frequency Factor
NICT	National Institute of Information and Communications Technology
NmF2	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2
Obs	Observe
S	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
SEALION	South East Asia Low-latitude Ionospheric Network
UB	ขอบเขตอ้างอิงด้านบน
URSI	The International Union of Radio Science
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การสื่อสารทางโทรคมนาคมปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางการสื่อสารทำให้มนุษย์ในปัจจุบันสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้แม้ว่าจะอยู่ห่างไกลกัน โดยการสื่อสารในช่วงแรกเริ่มต้นจากการส่งสัญญาณด้วยภาพ เช่น ไฟสัญญาณ, สัญญาณควัน, สัญญาณธง หรือการส่งสัญญาณด้วยเสียง เช่น กลอง, แตรและนกหวีด เป็นต้น และต่อมาได้พัฒนาเทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมด้วยไฟฟ้า และแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่ โทรเลข, โทรศัพท์, เครื่องข่าย, วิทยุ, เครื่องส่งไมโครเวฟ, ใยแก้วนำแสง, ดาวเทียมสื่อสารและอินเทอร์เน็ต โดยที่การสื่อสารแบบไร้สายนี้ได้เริ่มต้นขึ้นในศตวรรษที่ 19 โดยมีผู้บุกเบิกพัฒนาในการสื่อสารทางวิทยุคือ กุกลีเอลโม มาร์โคนี (Guglielmo Marconi) ซึ่งในปี 1897 ได้ประดิษฐ์เครื่องส่งวิทยุโทรเลขและได้ทำการทดลองส่งวิทยุโทรเลขไร้สายในระยะ 1 ไมล์ ซึ่งสามารถสะท้อนกับชั้นบรรยากาศโลก จนกระทั่งสามารถส่งข้ามมหาสมุทรแอตแลนติกได้ และได้รับรางวัลโนเบลในสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1909 จึงได้มีการศึกษาการส่งสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน จนกลายมาเป็นวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่า “Ionosphere Physics”

ชั้นบรรยากาศของโลกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางและชั้นบรรยากาศที่เป็นไอออนไนซ์ หรือเรียกอีกชื่อว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีขอบเขตประมาณ 50 กิโลเมตรถึง 2000 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก โดยที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยหลักๆ ได้ 3 ชั้น คือชั้น D, E และ F ตามระดับความสูงและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในชั้น โดยมีปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อความหนาแน่นและการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอน เช่น เวลากลางวันหรือกลางคืน การเกิดพายุ รวมไปถึงการเกิดสุริยุปราคา เป็นต้น

สุริยุปราคา (Solar Eclipse) หรือ สุริยุคราส เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ เกิดขึ้นเมื่อดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และโลก โคจรมาเรียงอยู่ในแนวเดียวกันโดยมีดวงจันทร์อยู่ตรงกลาง เกิดขึ้นเฉพาะในวันที่ดวงจันทร์มีการเกิดข้างขึ้นข้างแรมตรงกับจันทร์ดับ เมื่อสังเกตจากพื้นโลกจะเห็นดวงจันทร์เคลื่อนเข้ามาบดบังดวงอาทิตย์ โดยอาจบังมิดหมดทั้งดวงหรือบางส่วนก็ได้ ในแต่ละปีสามารถเกิดสุริยุปราคาบนโลกได้อย่างน้อย 2 ครั้ง สูงสุดไม่เกิน 5 ครั้ง ในจำนวนนี้อาจไม่มีสุริยุปราคาเต็มดวงเลยแม้แต่ครั้งเดียว [1] โดยที่สุริยุปราคาทำให้เกิดการศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ค่อยจะพบในชั้นบรรยากาศและส่งผลกระทบต่อการแพร่กระจายของคลื่นวิทยุโดยตรงกับเกิดการรบกวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นบรรยากาศชั้น F2

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 ในเวลาที่ต่างกันเป็นรายชั่วโมงและได้ทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานีคือ สถานีชุมพร

สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตต้าง ประเทศอินโดนีเซีย โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ.2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2561 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาแบบรายวัน รายฤดูกาลและรายปี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 กับค่าที่เก็บได้ เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลอง IRI ต่อไป นอกจากนี้ยังทำการศึกษาปรากฏการณ์สุริยุปราคาที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศในบริเวณที่สามารถมองเห็นได้ในประเทศไทยอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 ในเวลาที่ต่าง ๆ กันเป็นรายชั่วโมง

1.2.2 ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่เก็บค่าได้ แบ่งตามกาลเวลาแบบรายวัน รายฤดูกาลและรายปี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016

1.2.3 ศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์สุริยุปราคาที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศในบริเวณประเทศไทย

1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

1.3.1 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 โดยการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ.2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2561 จากสถานีไอโอโนสเฟียร์ทั้งหมด 3 สถานี คือ สถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตต้าง ประเทศอินโดนีเซีย

1.3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 แบบรายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016

1.3.3 วิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เทียบกับการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในชั้นบรรยากาศบริเวณประเทศไทย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำผลที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองของ IRI-model ต่อไป

1.4.2 เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการส่งสัญญาณสื่อสารทางวิทยุในย่านความถี่สูง การสื่อสารผ่านดาวเทียม ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

1.4.3 เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในการส่งสัญญาณช่วงต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในชั้นบรรยากาศบริเวณประเทศไทย

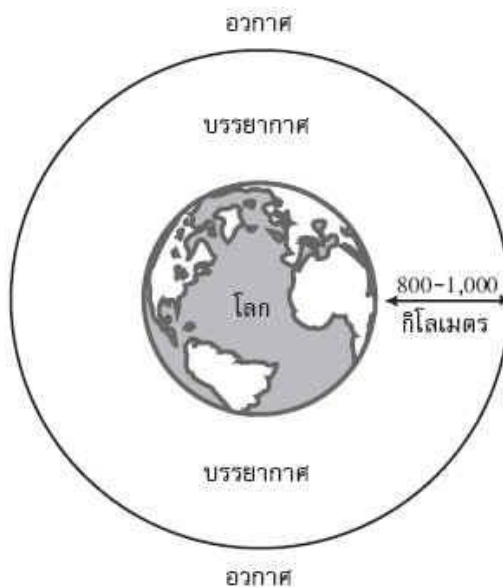
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ลักษณะของชั้นบรรยากาศ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เทคนิคไอโอโนซอนด์ แบบจำลอง IRI-model และปรากฏการณ์สุริยุปราคา ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้มีความจำเป็นสำหรับการศึกษาวิเคราะห์คุณลักษณะ การเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

2.1 ลักษณะของชั้นบรรยากาศ

ชั้นบรรยากาศ คือ ชั้นของอากาศที่ล้อมรอบโลกและด้วยแรงดึงดูดของโลกทำให้ชั้นบรรยากาศคงสภาพอยู่ได้ ชั้นบรรยากาศมีความหนาแน่นรวมแล้วประมาณ 500 กิโลเมตร อากาศในชั้นบรรยากาศแต่ละชั้นจะแตกต่างกัน แต่ในทุก ๆ ชั้นล้วนเป็นส่วนสำคัญของสิ่งแวดล้อมของโลก การแบ่งชั้นบรรยากาศ สามารถแบ่งออกได้ 4 แบบ ดังต่อไปนี้



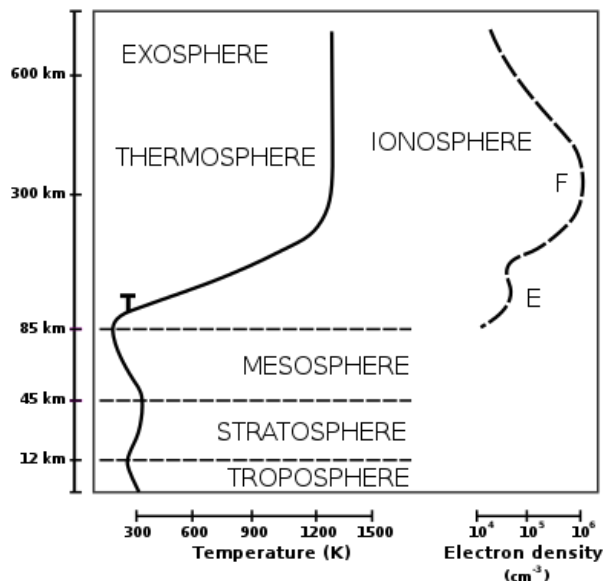
รูปที่ 2.1 ระยะความสูงของชั้นบรรยากาศกับโลก [11]

2.1.1 แบ่งชั้นบรรยากาศตามลักษณะและระดับความสูง

ชั้นบรรยากาศที่แบ่งตามลักษณะและระดับความสูง แบ่งได้ 2 ส่วน คือชั้นบรรยากาศส่วนล่างและชั้นบรรยากาศส่วนบน โดยที่ชั้นบรรยากาศส่วนล่างเป็นส่วนที่อยู่ใกล้ผิวโลก อุณหภูมิจะลดลงตามระดับความสูงทุกระยะที่สูงขึ้น 100 เมตร อุณหภูมิจะลดลง 0.64 องศาเซลเซียสจนกว่าจะถึงชั้นบรรยากาศส่วนบน โดยแบ่งได้ทั้งหมด 3 ชั้นคือ โทรโพสเฟียร์ (Troposphere) คือบรรยากาศชั้น

ล่างสุดสูงจากผิวโลก 8-15 กิโลเมตร มีอิทธิพลต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมมากที่สุด อากาศที่มนุษย์หายใจเข้าไปคืออากาศชั้นนี้ เมฆ พายุ ลม และลักษณะอากาศต่าง ๆ เกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นนี้ อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้งและรวดเร็วกว่าบรรยากาศชั้นอื่น ๆ และชั้นต่อมา คือสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) มีความสูง 15-50 กิโลเมตร โดยบรรยากาศชั้นนี้มีก๊าซโอโซนเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย และก๊าซโอโซนนี้เอง ที่ทำหน้าที่ดูดซับรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นรังสีอันตรายต่อผิวหนังของมนุษย์และพืชไม่ให้ส่องลงมากกระทบถึงพื้นโลก ก๊าซชนิดนี้เกิดจากการที่โมเลกุลของก๊าซออกซิเจนแตกตัว และจัดรูปแบบขึ้นใหม่เมื่อถูกรังสีจากดวงอาทิตย์ช่วยดูดซับทำให้บรรยากาศอุ่นขึ้น เครื่องบินไอพ่นจะบินในชั้นนี้เนื่องจากมีทัศนวิสัยดี และชั้นสุดท้าย คือมีโซสเฟียร์ (Mesosphere) มีความสูงจากพื้นดิน 50-80 กิโลเมตรเหนือชั้นโอโซน อุณหภูมิจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นโดยอาจต่ำได้ถึง 83 องศาเซลเซียส อุณหภูมิหรือชั้นส่วนหินจากอวกาศที่ตกลงมามักถูกเผาไหม้ในชั้นนี้และการส่งคลื่นวิทยุทั่ว ๆ ไปก็ส่งในชั้นนี้เช่นกัน

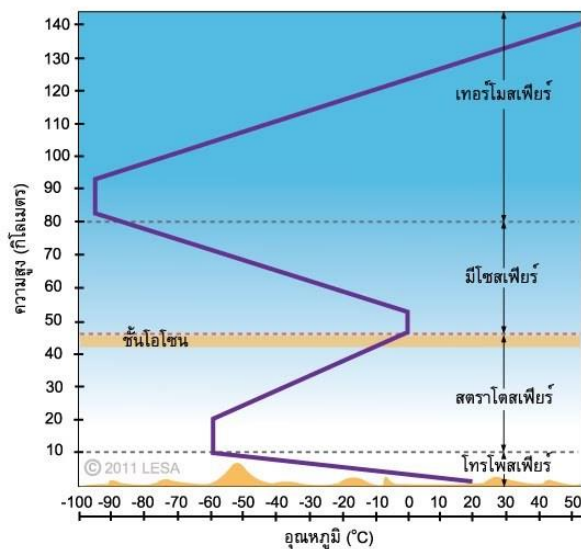
ชั้นบรรยากาศส่วนบนมีคุณสมบัติตรงข้ามกับบรรยากาศส่วนล่าง คือแทนที่อุณหภูมิจะลดลงแต่กลับสูงขึ้นและยิ่งสูงยิ่งร้อนมากบรรยากาศส่วนนี้แบ่งเป็น 3 ชั้นเช่นกัน คือเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) มีความสูง 80-450 กิโลเมตร ความหนาแน่นของอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็วแต่อุณหภูมิจะสูงขึ้นมาก ซึ่งอาจสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส สามารถส่งวิทยุคลื่นยาวกว่า 17 เมตรไปได้ทั่วโลก โดยส่งสัญญาณจากพื้นโลกให้คลื่นสะท้อนกับชั้นไอออนของก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งถูกรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอกซ์ทำให้แตกตัว ต่อมาคือชั้นเอกโซสเฟียร์ (Exosphere) บรรยากาศชั้นนี้สูงจากพื้นโลกประมาณ 450-900 กิโลเมตร มีก๊าซอยู่น้อยมาก มนุษย์อวกาศจะต้องควบคุมบรรยากาศให้มีความดันเท่ากับความดันภายในร่างกาย ต้องสวมใส่ชุดที่มีก๊าซออกซิเจนเพื่อช่วยในการหายใจ ดาวเทียมพยากรณ์อากาศจะโคจรรอบโลกในชั้นนี้และชั้นสุดท้าย คือแมกเนโตสเฟียร์ (Magnetosphere) ชั้นนี้มีความสูงมากกว่า 900 กิโลเมตร ไม่มีก๊าซใด ๆ อยู่เลย



รูปที่ 2.2 การแบ่งชั้นบรรยากาศตามลักษณะและระดับความสูง [12]

2.1.2 แบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์

ชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์สามารถแบ่งได้ 4 ชั้น คือชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) อยู่ระหว่าง 0-10 กิโลเมตร โดยอุณหภูมิจะค่อย ๆ ลดลงตามความสูงโดยเฉลี่ยกิโลเมตรละ 6.5 องศาเซลเซียส เป็นชั้นที่สำคัญมากเพราะเป็นบริเวณที่มีไอน้ำ เมฆ หมอก และพายุ ชั้นที่สองคือสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) อยู่ระหว่างความสูง 10-50 กิโลเมตร เป็นชั้นที่ไม่มีเมฆ มักใช้ในการเดินทางทางอากาศ โดยอุณหภูมิจะคงที่จนถึงความสูง 50 กิโลเมตร และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในอัตรา 0.5 องศาเซลเซียสต่อ 1 กิโลเมตร ชั้นที่สามคือ เมโซสเฟียร์ (Mesosphere) เป็นชั้นบรรยากาศระหว่าง 50-80 กิโลเมตร โดยอุณหภูมิลดลงตามความสูง และชั้นสุดท้ายคือเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) มีความสูงตั้งแต่ 80-500 กิโลเมตร อุณหภูมิจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วอัตราการสูงขึ้นจะลดลง อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 227-1727 องศาเซลเซียส โดยชั้นนี้มีความหนาแน่นของอนุภาคต่าง ๆ จางมาก แต่ก๊าซต่าง ๆ ในชั้นนี้จะอยู่ในลักษณะที่เป็นอนุภาคที่เป็นประจุไฟฟ้าเรียกว่า อิออน สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ บรรยากาศในชั้นนี้ถือเป็นบริเวณที่เปลี่ยนจากบรรยากาศของโลกมาเป็นก๊าซระหว่างดาวที่เบาบางและเป็นชั้นนอกสุดของบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก เรียกว่า เอกโซสเฟียร์ ดังรูปที่ 2.3

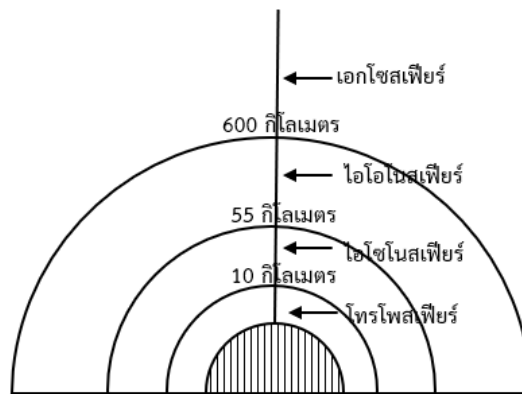


รูปที่ 2.3 การแบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้อุณหภูมิเป็นเกณฑ์ [11]

2.1.3 แบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเป็นเกณฑ์

ชั้นบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเป็นเกณฑ์แบ่งได้ 4 ชั้น คือโทรโพสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ติดกับพื้นโลก มีความสูง 0-10 กิโลเมตร มีก๊าซที่สำคัญ คือไอน้ำ ชั้นที่สอง คือโอโซนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศสูง 10-50 กิโลเมตร มีก๊าซที่สำคัญ คือโอโซน ชั้นที่สาม คือไอโอโนสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศ

ที่มีความสูง 80-600 กิโลเมตร มีสิ่งที่สำคัญ คือไอออน และชั้นสุดท้าย คือเอกโซเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่มีความสูงตั้งแต่ 600 กิโลเมตรขึ้นไป โดยความหนาแน่นของอะตอมต่าง ๆ มีค่าน้อยลง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การแบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเป็นเกณฑ์ [11]

2.1.4 แบ่งชั้นบรรยากาศทางอุตุนิยมวิทยา

ชั้นบรรยากาศทางอุตุนิยมวิทยาแบ่งได้ 5 ชั้น โดยที่ชั้นแรก คือบริเวณที่มีอิทธิพลความฝืดระหว่าง 0-2 กิโลเมตร ชั้นที่สอง คือโทรโพสเฟียร์ชั้นกลางและบน โดยจะมีอุณหภูมิจะลดลงสม่ำเสมอตามความสูง ชั้นที่สาม คือโทรโพสเฟียร์เป็นเขตแบ่งว่ามีไอน้ำกับไม่มีไอน้ำ ชั้นที่สี่ คือสตราโตสเฟียร์มีไอโซนมากและชั้นสุดท้าย คือบรรยากาศชั้นสูงคล้ายกับเอกโซสเฟียร์

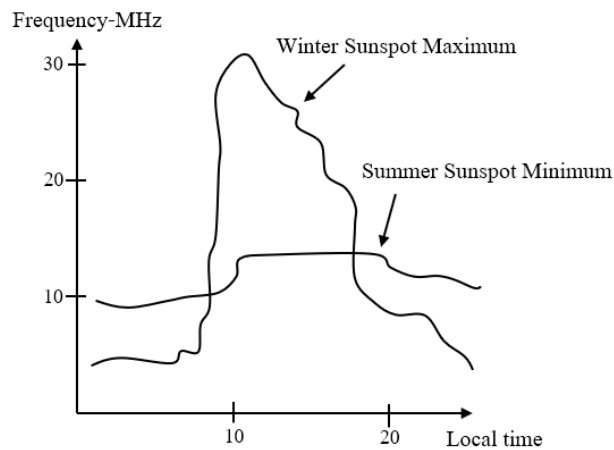
โดยชั้นบรรยากาศที่จะทำการศึกษา คือชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศสูง 80 กิโลเมตร ถึง 600 กิโลเมตร เป็นชั้นบรรยากาศของโลกที่กลายเป็นไอออนเนื่องจากการแผ่รังสีสุริยะ โดยแบ่งชั้นบรรยากาศโดยใช้ก๊าซเป็นเกณฑ์ ตามหัวข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ห่างจากผิวโลกมากที่สุดรวมถึงเกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ HF มากที่สุดอีกด้วย สิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือ ความสามารถหักคลื่นวิทยุให้สะท้อนกลับมาที่โลกเป็นการเพิ่มระยะทางส่งได้มากขึ้น ซึ่งในชั้นบรรยากาศอื่นไม่มีคุณสมบัตินี้อยู่ นิยมใช้งานกันในย่านความถี่ HF ลงไปถ้าสูงกว่านี้ อย่างย่าน VHF ไม่สามารถส่งโดยวิธีนี้ได้เพราะจะทะลุชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไป การแพร่กระจายของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์เข้าหาชั้นบรรยากาศของโลกทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานเข้าสู่โมเลกุลของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization) ของโมเลกุลขึ้น

การไอออไนซ์ คือขบวนการวิธีดึงอิเล็กตรอนออกจากอะตอม ซึ่งอะตอมที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีลักษณะทางไฟฟ้าเป็นประจุไฟฟ้าบวก นอกจากนี้ยังได้ประจุไฟฟ้าลบและอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก ปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะมีค่าขึ้น ๆ ลง ๆ ตลอดตามการเปลี่ยนแปลง

ของรังสีอุลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ที่มีการแพร่กระจายรังสีสูงสุดในเวลากลางวันและต่ำสุดในเวลากลางคืน ทำให้ค่าความถี่ MUF เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลาในหนึ่งวัน ดังรูปที่ 2.5



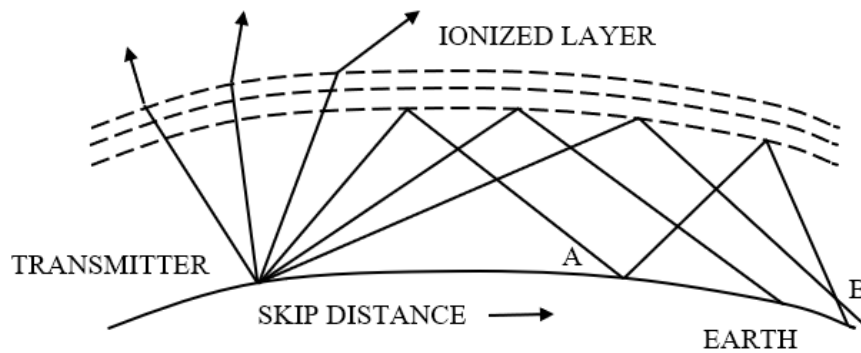
รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ MUF [13]

เห็นได้ว่าการใช้ค่าความถี่ MUF ที่ค่าใดค่าหนึ่งทำได้ยาก เพราะอาจทำให้ระบบสื่อสารขาดความแน่นอนลงไป ดังนั้นจึงคิด MUF ที่ค่าประมาณ 85% ของค่า MUF ที่ปรากฏเพื่อใช้ส่งคลื่นวิทยุที่มีพฤติกรรมค่อนข้างแน่นอนเรียกค่านี้ว่าความถี่ใช้งานที่เหมาะสม (Optimum Working Frequency : OWF)

MUF หรือ Maximum Useable Frequency เป็นความถี่ที่จำกัดอยู่เช่นกัน สำหรับมุมเฉพาะบางมุมของการตกกระทบมากกว่าจุดปกติ ในความเป็นจริงถ้ามุมของการตกกระทบระหว่างคลื่นตกกระทบกับจุดปกติ คือค่า A ดังนั้น

$$MUF = \text{Critical Frequency} / \cos A \quad (2.1)$$

สูตรนี้เราเรียกว่า Secant law และมีประโยชน์อย่างมากในการคำนวณเบื้องต้นเพื่อหาค่าของ MUF โดยเฉพาะสามารถประยุกต์ได้เฉพาะกับพื้นโลกและชั้นบรรยากาศสะท้อนที่ราบอย่างไรก็ตามมุมของการตกกระทบไม่ใช่ส่วนสำคัญที่สุด เพราะมันกำหนดได้โดยระยะทางระหว่างจุดที่ซึ่งเป็นจุดต่อโดย Sky wave Link โดยแสดงดังรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าคลื่นที่มีมุมยิ่งต่ำกว่ามุมวิกฤตมากขึ้น ระยะทางที่คลื่นเดินทางจะไกลขึ้นแต่ถ้ามีมุมยิ่งมากกว่ามุมวิกฤต คลื่นจะทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ไป



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมของคลื่นเมื่อมีมุมตกกระทบต่างกัน [13]

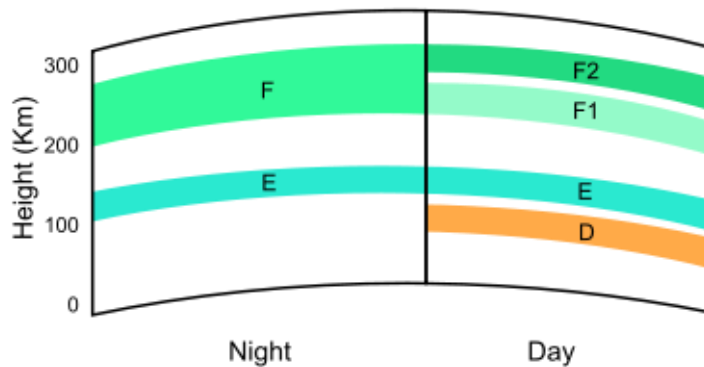
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยหลัก ๆ ได้ 3 ชั้นคือชั้น D, E และ F ตามระดับความสูงและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในชั้น โดยเริ่มจากชั้น D ซึ่งเป็นชั้นที่มีความสูงจากพื้นโลกต่ำที่สุด มีขอบเขตอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 กิโลเมตร ซึ่งจะปรากฏให้เห็นได้เฉพาะเวลากลางวันและหายไปในเวลากลางคืน เนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ของอนุภาคมีค่าสูงสุด โดยมีค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์จะมีความสูงสุดในช่วงเวลากลางวันและค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วงจาก 10^8 และ 10^{10} eV/m^3 เป็นชั้นที่มีบทบาทต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ คือจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นที่ความถี่ MF, HF และ VHF และมันยังสะท้อนสัญญาณในช่วงความถี่ LF และ VLF เนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นนี้มีไม่เพียงพอ (ประมาณ 10^9 eV/m^3) และมีความถี่ในการชนกันของอิเล็กตรอนและอนุภาคที่เป็นกลางที่อัตราที่สูง (ประมาณ 10^6 ครั้งต่อวินาที) จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อคลื่นวิทยุให้เลี้ยวเบนได้ ดังนั้นจึงมีผลกระทบแค่การลดทอนของคลื่นสัญญาณเมื่อเดินทางผ่านชั้นนี้ และเนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำนี้ทำให้ไม่สามารถศึกษาได้ด้วยวิธีไอโอโนซอนด์ แต่ใช้เทคนิคอื่นได้ เช่น การกระจัดกระจายไม่รวมใน (Incoherent scatter) การวัดโดยใช้จรวด Wave interaction และอื่น ๆ เป็นต้น

ชั้นถัดมาคือชั้น E วางตัวอยู่เหนือชั้น D ที่ความสูง 90 ถึง 140 กิโลเมตร มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากที่สุดที่ระดับความสูง 110 กิโลเมตร พบเห็นในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการไอออไนซ์ค่อนข้างมาก ส่วนในเวลากลางคืน มีการไอออไนซ์ที่น้อยมาก โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นนี้อยู่ในช่วงประมาณ 10^5 ถึง 4.5×10^5 eV/m^3 ในช่วงเวลากลางวันและมีค่าประมาณ 5×10^5 eV/m^3 ในช่วงเวลากลางคืน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งชั้น E นี้จะมีผลเพียงเล็กน้อยกับการสะท้อนของคลื่น HF ในเวลากลางวัน ในบางครั้งมีปรากฏการณ์การไอออไนซ์ที่ผิดปกติในชั้น E เรียกว่า Sporadic-E แทนด้วยสัญลักษณ์ Es โดยเกิดจากการแทรกสอดอย่างรุนแรงของคลื่นย่าน VHF และเป็นการเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น โดยปกติจะมีรูปแบบคล้ายก้อนเมฆมีลักษณะเป็นหย่อม ๆ และจะเปลี่ยนแปลงขนาดตั้งแต่ 1 กิโลเมตรจนถึงหลาย ๆ ร้อยกิโลเมตร การเกิดขึ้นและความเข้มของการไอออไนซ์จะไม่มีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยการเกิดขึ้นนี้ไม่สามารถทำนายได้และยังสามารถพบได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน หรือในฤดูใด ๆ ก็ได้ ชั้น E และชั้น Es เป็นชั้นที่บางมากแต่มีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูง (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่า

เกือบ 10 เท่าของชั้น E ปกติ) และจะปรากฏที่ใดก็ได้ในระยะความสูงตั้งแต่ 90-120 กิโลเมตร ซึ่งชั้น Es นี้มีความสำคัญในการสะท้อนคลื่นวิทยุในย่านความถี่ต่ำกว่า 100 MHz

ชั้นต่อมาคือ ชั้น F เป็นชั้นย่อยบนสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีการไอโอไนซ์มากที่สุด และเป็นเพียงชั้นเดียวที่รักษาการไอโอไนซ์โดยไม่ขึ้นอยู่กับการขึ้นหรือตกของดวงอาทิตย์ ชั้น F เป็นชั้นที่อำนวยความสะดวกในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะทางไกลแม้ในยามกลางคืน การปรากฏขึ้นได้ของชั้น F ในเวลากลางคืนเนื่องมาจากว่าชั้น F เป็นชั้นบนสุดที่มีการไอโอไนซ์สูงมาก ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ถูกไอโอไนซ์แล้วเหลืออยู่แม้ไม่ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์แล้วก็ตาม และอีกหนึ่งเหตุผลคือค่าความหนาแน่นในการไอโอไนซ์มีค่าสูงในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอากาศมีไม่มากนัก ณ ความสูงระดับนี้ ดังนั้นโมเลกุลเกือบทั้งหมดในชั้นนี้จึงเป็นโมเลกุลที่ถูกไอโอไนซ์ โดยอนุภาคที่ถูกไอโอไนซ์ในการก่อตัวชั้นเป็นชั้นนี้ คือ อะตอมของออกซิเจน

โดยที่ชั้น F จะแยกออกเป็น 2 ชั้นคือชั้น F1 และ F2 โดยปรากฏการณ์นี้จะพบตลอดทั้งปีในบริเวณละติจูดต่ำ และปรากฏเฉพาะฤดูร้อนเท่านั้นในบริเวณละติจูดสูง โดยชั้น F1 จะวางตัวอยู่ในระดับความสูงประมาณ 140-250 กิโลเมตร โดยมีค่าระดับความสูงเฉลี่ยคือ 220 กิโลเมตร ส่วนชั้น F2 เป็นชั้นที่วางตัวอยู่บนสุดโดยมีระดับความสูงอยู่ที่ 250-400 กิโลเมตร โดยช่วงเวลากลางวันค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้น F2 จะมีค่ามากที่สุด ในบรรยากาศย่อยอื่น ๆ ทั้งหมดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ส่วนในเวลากลางคืนชั้น F1 และ F2 จะรวมตัวกันเป็นชั้น F และมีระดับความสูงประมาณ 300 กิโลเมตร โดยการเปลี่ยนแปลงความสูงและความหนาแน่นของชั้น F2 นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น เวลา อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศ และรอบวัฏจักรสุริยะ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.7

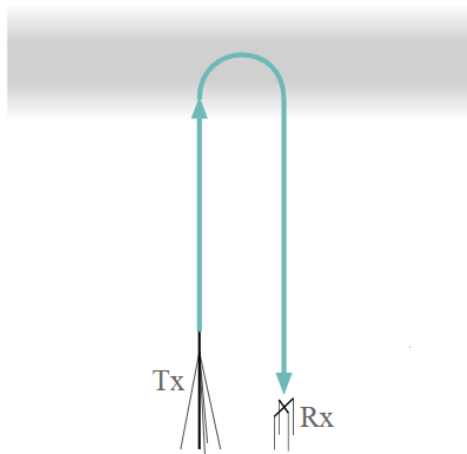


รูปที่ 2.7 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและเวลากลางคืน [12]

2.3 เทคนิคไอโอโนซอนด์ (Ionosonde)

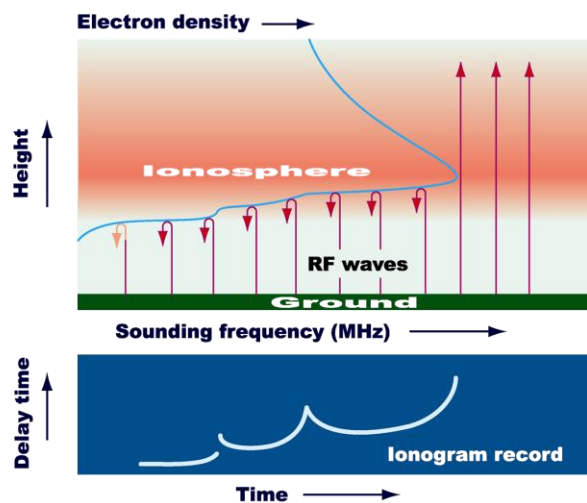
เทคนิคไอโอโนซอนด์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ถูกประดิษฐ์ขึ้น โดย Gregory Breit และ Merle A. Tuve และพัฒนาขึ้นในปลายปี ค.ศ. 1920 [12] โดยนักฟิสิกส์ผู้มีชื่อเสียงจำนวนมากรวมถึง Edward Victor Appleton จากนั้นถูกสร้างและได้รับการ

พัฒนาในประเทศสหรัฐอเมริกา จนในปี ค.ศ. 1970 ได้เริ่มมีการทดลองโดยใช้เทคโนโลยีมาออกแบบ และประมวลผลผลลัพธ์แทนที่จะต้องวิเคราะห์ข้อมูลด้วยตนเอง จึงทำให้ข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์นั้นถูกประเมินภายในเครื่องคอมพิวเตอร์มาจนถึงปัจจุบัน โดยที่เทคนิคไอโอโนซอนด์มีหลักการคล้ายคลึงกับเรดาร์ คือ เครื่องส่งสัญญาณที่ปล่อยคลื่นวิทยุออกมาในทิศทางที่กำหนดไว้ เมื่อสิ่งเหล่านี้สัมผัสกับวัตถุพวกมันมักจะสะท้อนกลับหรือกระจายอยู่ในหลาย ๆ ทิศทางโดยการคำนวณเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ทั้งไปและกลับ ดังรูปที่ 2.8 แต่เทคนิคไอโอโนซอนด์จะใช้ในย่านความถี่ที่ไม่สูงมาก โดยจะทำการส่งคลื่นความถี่ย่าน HF (High Frequency) ที่มีความถี่ตั้งแต่ 2-30 MHz โดยการส่งและรับเครื่องจะทำการส่งและรับคลื่นอย่างต่อเนื่อง โดยการมอดูเลชันจะใช้เทคนิคการมอดูเลชันแบบต่อเนื่อง (Continuous wave-frequency modulation) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แบบจำลองการส่งคลื่นสะท้อนกลับ [14]

Ionospheric Observation Technique (Ionosonde)

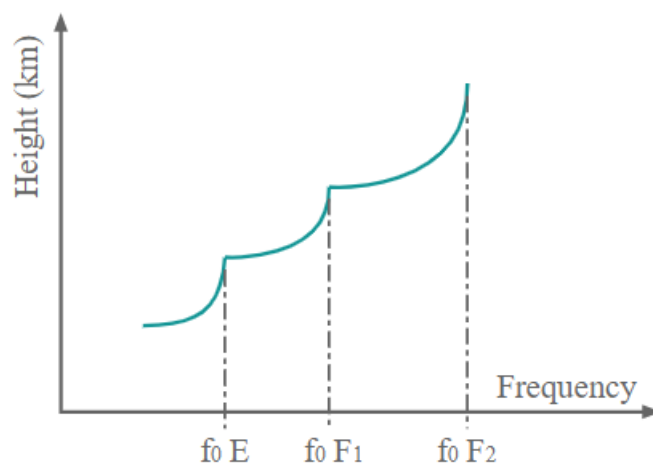


รูปที่ 2.9 การจำลองส่งคลื่นไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคไอโอโนซอนด์ [18]

มีหลายเทคนิคที่ใช้ศึกษาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น เทคนิคไอโอโนซอนด์, การวัดการหมุนของพาราเดย์, เทคนิคดาวเทียมและจรวด, เรดาร์กระจายไม่ต่อเนื่อง (ISR), ระบบกำหนดตำแหน่งทั่วโลก (GPS), เทคนิคการทำให้เกิดเสียง Doppler แต่เทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือเทคนิคไอโอโนซอนด์ (Ionosonde) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นเฉพาะเทคนิคไอโอโนซอนด์

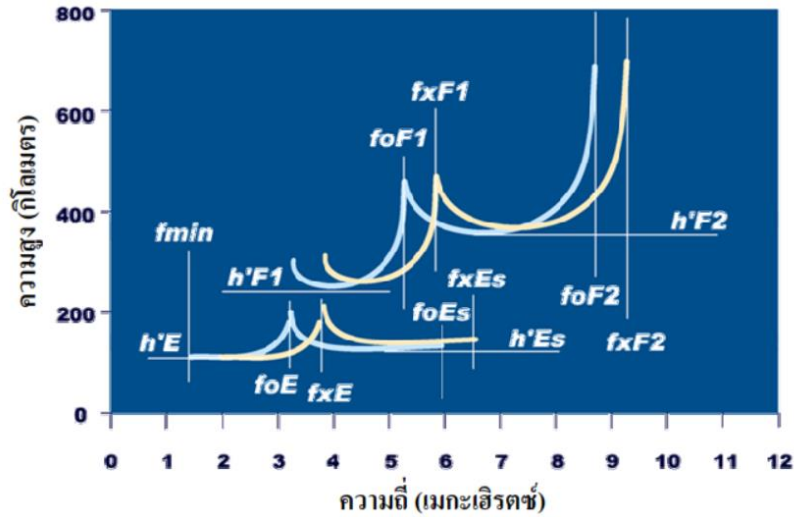
2.3.1 ไอโอโนแกรม

ไอโอโนแกรม (Ionogram) คือ รูปที่แสดงการสะท้อนของความถี่จากการส่งและรับคลื่นในชั้นบรรยากาศ ซึ่งได้จากเทคนิคไอโอโนซอนด์ โดยที่ไอโอโนแกรมใช้ในการบอกค่าความถี่ของการส่งคลื่นวิทยุในชั้นบรรยากาศ โดยมีแกนแนวตั้งแสดงความสูงและแกนแนวนอนแสดงความถี่



รูปที่ 2.10 การส่งสัญญาณในอุดมคติ [14]

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าสัญญาณถูกส่งขึ้นไปเมื่อถึงชั้น D จะถูกดูดซับและไม่มีการสะท้อนกลับ ต่อมาเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นมาจนถึงชั้น E จะได้ค่าความถี่วิกฤติที่ชั้น E หรือ foE และเมื่อสัญญาณขึ้นไปถึงชั้น F1 และ F2 ก็จะทำให้การสะท้อนกลับได้ค่าความถี่วิกฤติ คือ foF1 และ foF2 ตามลำดับ โดยที่เราสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศจากภาพไอโอโนแกรม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.11



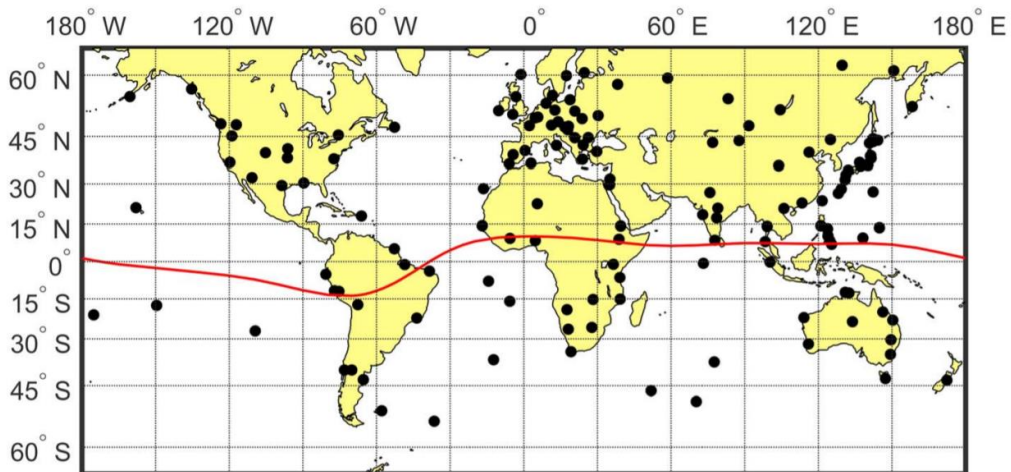
รูปที่ 2.11 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่อ่านได้จากภาพไอโอโนแกรม [18]

ชั้น E จะประกอบไปด้วยตัวแปรต่าง ๆ คือ ความสูงของชั้น E ($h'E$), ความสูงของชั้น Es ($h'Es$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น E (foE), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น Es ($foEs$), ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น E (fxE) และความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น Es ($fxEs$)

ส่วนในชั้น F จะประกอบด้วย ความสูงชั้น F1 ($h'F1$), ความสูงชั้น F2 ($h'F2$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F1 ($foF1$), ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F1 ($fxF1$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F2 ($foF2$) และความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F2 ($fxF2$) โดยชั้น E และ F1 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในช่วงเวลากลางวัน ส่วนชั้น D เป็นชั้นที่มีค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่ำจึงไม่สามารถอ่านค่าการสะท้อนของชั้นจากไอโอโนแกรมได้

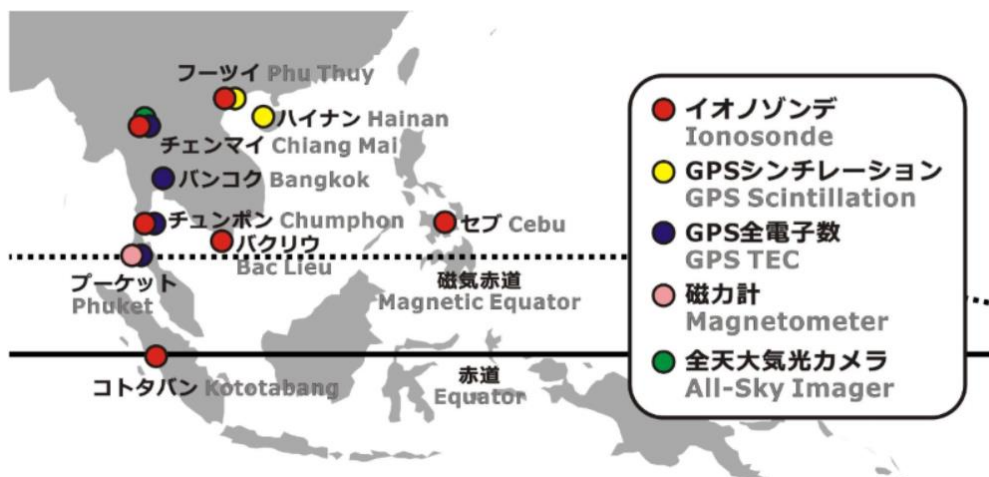
2.3.2 สถานีไอโอโนซอนด์

สถานีไอโอโนซอนด์ (Ionosonde station) เป็นสถานีที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์และศึกษาการรบกวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ โดยได้มีการติดตั้งสถานีไว้ทั่วโลก ส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณละติจูดสูงและละติจูดกลาง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บริเวณที่ติดตั้งสถานี Ionosonde ทั่วโลก [20]

ส่วนในพื้นที่บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้มีการติดตั้งสถานี Ionosonde ทั้งหมด 6 สถานีภายใต้โครงการ SEALION (South East Asia Low-latitude Ionospheric Network) เป็นโครงการที่ได้รับการสนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติ (NICT) ประเทศญี่ปุ่นและได้รับความร่วมมือกับสถาบันและมหาวิทยาลัยที่เป็นพันธมิตรในภูมิภาคอาเซียน ในปี พ.ศ. 2546 เพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบและศึกษาการรบกวนของอิลีกตรอนบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเหนือและใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศาหรือเรียกว่าบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) สำหรับทั่วโลกมีเพียงอเมริกาใต้ในบราซิลและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เท่านั้นที่สามารถวางอุปกรณ์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอโอสเฟียร์ในบริเวณนี้ได้



รูปที่ 2.13 สถานีไอโอโนซอนดในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [21]

ตารางที่ 2.1 สถานีไอโอโนสเฟียร์และตำแหน่งที่ตั้งบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

Site (ID)	Lat.	Lon.	Dip Lat.*	Country	Method
Chiang Mai (CMU)	18.76	98.93	12.7	Thailand	Ionosonde (FMCW) GPS-TEC All-Sky Imager
Bangkok (KMI)	13.73	100.78	6.7	Thailand	GPS-TEC
Chumphon (CPN)	10.72	99.37	3	Thailand	Ionosonde (FMCW) GPS-TEC
Phuket (PKT)	8.09	98.32	-0.2	Thailand	Magnetometer
Phuket (PTC)	7.9	98.39	-0.4	Thailand	GPS-TEC
Kototabang (KTB)	-0.2	100.32	-10.1	Indonesia	Ionosonde (FMCW)
Phu Thuy (PHT)	21.03	105.96	15.6	Vietnam	Ionosonde (FMCW) GPS-Scintillation
Bac Lieu (BCL)	9.3	105.71	1.5	Vietnam	Ionosonde (FMCW)
Hainan (HAN)	19.53	109.13	13.7	China	GPS-Scintillation
Cebu (CEB)	10.35	123.91	3.09	Philippines	Ionosonde (FMCW)

2.4 แบบจำลอง International Reference Ionosphere (IRI)

แบบจำลอง International Reference Ionosphere (IRI) เป็นหนึ่งในแบบจำลองของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่ามัธยฐานรายเดือนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน, อุณหภูมิของอิเล็กตรอน, อุณหภูมิของไอออน, ปริมาณอิเล็กตรอน (TEC) ในช่วงความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร ถึง 1,500 กิโลเมตร, ผลกระทบของพายุไอโอโนสเฟียร์ต่อความหนาแน่นสูงสุดของชั้น E และชั้น F เป็นต้น เกิดขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2521 โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองมาตรฐานที่มาจากข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมด โดยใช้แหล่งข้อมูลที่สำคัญคือเครือข่ายทั่วโลกของ ionosondes, เรดาร์ (Jicamarca, Arecibo, Millstone Hill, Malvern, St. Santin), ISIS และ Alouette topside sounders และอุปกรณ์ในแหล่งกำเนิดของจรวดและดาวเทียม เป็นต้น และได้มีการปรับปรุงแบบจำลองมาแล้วหลายครั้ง โดยที่ IRI ได้รับการอัปเดตทุกปีในระหว่างการประชุมเชิงปฏิบัติการพิเศษของ IRI และการอัปเดตล่าสุดได้รับการเผยแพร่ในปี 2559 หรือที่เรียกว่า IRI-model 2016 [40] การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญที่สุดใน IRI-model 2016 ได้แก่ ตัวเลือกรูปแบบใหม่สำหรับพารามิเตอร์โปรไฟล์ด้านล่าง พารามิเตอร์ความหนา (B0) พารามิเตอร์รูปร่าง (B1) และความสูงของชั้น F (F-peak height) 3 แบบ AMTB2013, SHU-2015, BSE-1979 เป็นต้น

แบบจำลอง IRI ใช้ฟังก์ชันการวิเคราะห์เพื่อคำนวณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศชั้น F2 โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ ความถี่วิกฤตของชั้น F2 (foF2) ความสูงสูงสุดของชั้น F2 (hmF2) พารามิเตอร์ความหนา (B0) และพารามิเตอร์รูปร่าง (B1) โดยมีพารามิเตอร์หลัก 2 ตัวที่ใช้ในหาค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนโดยใช้แบบจำลอง IRI คือ foF2 และ hmF2 แบบจำลอง IRI ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ 2 โปรแกรมที่แตกต่างกันในการทำนายหา

ค่าพารามิเตอร์ foF2 และ hmF2 ตามค่าเฉลี่ยการทำงาน 12 เดือนของจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ คือแบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Radio Consultative Committee (CCIR, 1966) [19] และแบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Union of Radio Science (URSI, 1989) [19]

The International Reference Ionosphere (IRI) เป็นโครงการระหว่างประเทศที่ได้รับ การสนับสนุนจากคณะกรรมการการวิจัยอวกาศ Committee On SPACE Research (COSPAR) และ สหภาพวิทยาศาสตร์วิทยุระหว่างประเทศ the International Union of Radio Science (URSI) โดย องค์การเหล่านี้ได้จัดตั้งคณะกรรมการไว้ทั่วโลก โดยมีรายชื่อสมาชิกดังนี้ [19]

ตารางที่ 2.2 คณะกรรมการอำนวยการของแบบจำลอง IRI

ตำแหน่ง	รายชื่อคณะกรรมการอำนวยการ
ประธาน (Chairperson)	D. Altadill (Spain)
รองประธาน (Vice-Chairperson)	A. Krankowski (Poland) URSI
รองประธาน (Vice-Chairperson)	I. Galkin (USA) COSPAR
เลขานุการบริหาร (Executive Secretary)	D. Bilitza (USA)
บรรณาธิการ (Editor)	B. Reinisch (USA)

ตารางที่ 2.3 สมาชิกตามประเทศของแบบจำลอง IRI

ประเทศ (Country)	รายชื่อสมาชิกตามประเทศ (Members by Country)
Argentina	R. Ezquer, M. Mosert de Gonzalez
Australia	B. Ward, P. Wilkinson
Austria	M. Friedrich
Brazil	M. Abdu
Bulgaria	I. Kutiev
Canada	D. Themens
China	Jiankui Shi, W. Wan, M.-L. Zhang
Czech Republic	D. Buresova, L. Triskova, V. Truhlik
Cyprus	H. Haralambous
France	D. Alcayde, P. Coisson, R. Hanbaba
Germany	C. Stolle, W. Singer
India	P.K. Bhuyan, S.P. Gupta, K.K. Mahajan
Italy	B. Nava, M. Pezzopane, S. Radicella, B. Zolesi
Ivory coast	O. Obrou
Japan	K. Igarashi, K. Oyama, S. Watanabe
Nigeria	J. Adeniyi, E. Oyeyemi

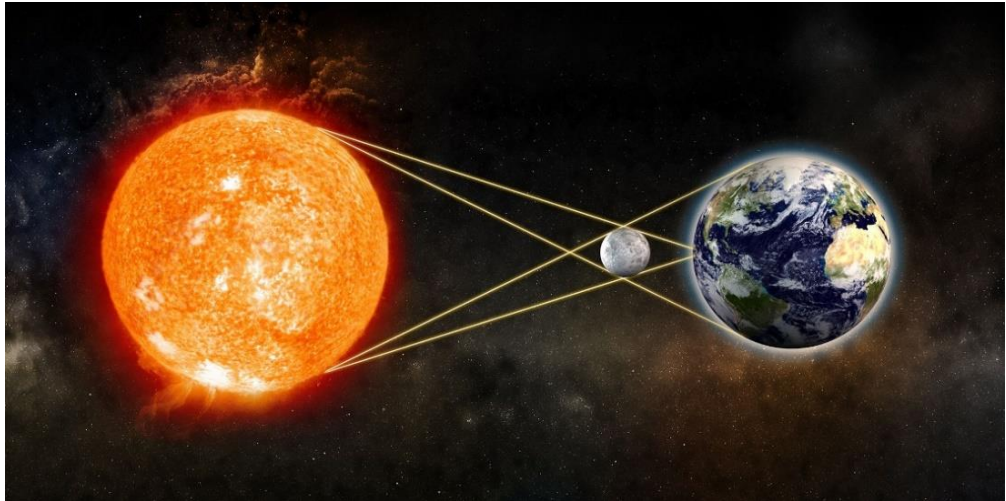
ตารางที่ 2.3 สมาชิกตามประเทศของแบบจำลอง IRI (ต่อ)

ประเทศ (Country)	รายชื่อสมาชิกตามประเทศ (Members by Country)
Poland	A. Krankowski, H. Rothkaehl, I. Stanislawska
Russia	A. Danilov, V. K. Depuev, T. Gulyaeva, A. Mikhailov, S. Pulinets K.G. Ratovsky, I. Zakharenkova
South africa	L.-A. McKinnell, A. Poole
South korea	K. Min
Spain	D. Altadill
Taiwan	J.-Y. (Tiger) Liu, S.-Y. Su
Thailand	P. Kenpankho, P. Supnithi
Turkey	F. Arikan
Zambia	P. Sibanda
Uganda	J.B. Habarulema
U.k.	L.R. Cander, M. Rycroft
Ukraine	I. Cherniak
Usa	D. Anderson, E. Araujo-Pradere, D. Bilitza, M. Codrescu, T. Fuller-Rowell, C. Mertens, B. Reinisch, L. Scherliess, J. Sojka, V. Wickwar, S-R. Zhang, I. Galkin

โดยมีงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นจำนวนมากเกี่ยวกับการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำการวัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองของ IRI แต่การศึกษาและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยถือว่ายังมีน้อยอยู่

2.5 สุริยุปราคา (Solar Eclipse)

สุริยุปราคา หรือ สุริยุคราส เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ เกิดขึ้นเมื่อดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และโลก โคจรมาเรียงอยู่ในแนวเดียวกันโดยมีดวงจันทร์อยู่ตรงกลาง เกิดขึ้นเฉพาะในวันที่ดวงจันทร์มีดิถีตรงกับจันทร์ดับ เมื่อสังเกตจากพื้นโลกจะเห็นดวงจันทร์เคลื่อนเข้ามาบดบังดวงอาทิตย์ โดยอาจบังมิดหมดทั้งดวงหรือบางส่วนก็ได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 ในแต่ละปีสามารถเกิดสุริยุปราคาบนโลกได้อย่างน้อย 2 ครั้ง สูงสุดไม่เกิน 5 ครั้ง ในจำนวนนี้อาจไม่มีสุริยุปราคาเต็มดวงเลยแม้แต่ครั้งเดียว หรืออย่างมากไม่เกิน 2 ครั้ง โอกาสที่จะได้เห็นสุริยุปราคาเต็มดวงสำหรับสถานที่ใดสถานที่หนึ่งบนพื้นโลกนั้นค่อนข้างยาก เนื่องจากสุริยุปราคาเต็มดวงแต่ละครั้งจะเกิดในบริเวณแคบ ๆ ภายในแถบที่เงามืดของดวงจันทร์พาดผ่านเท่านั้น สุริยุปราคาสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะเงาของดวงจันทร์ที่ตกกระทบพื้นโลกและค่าอัตราส่วนระหว่างขนาดปรากฏของดวงจันทร์กับดวงอาทิตย์ในขณะที่เกิดสุริยุปราคา



รูปที่ 2.14 การเกิดสุริยุปราคา [22]

2.5.1 สุริยุปราคาเต็มดวง (Total eclipse)

เกิดจากการที่ดวงจันทร์มีวงโคจรค่อนข้างรี ดังนั้นดวงจันทร์จึงมีโอกาสอยู่ใกล้หรือไกลจากโลกได้ ถ้าเกิดสุริยุปราคาในช่วงที่ดวงจันทร์อยู่ใกล้โลก เราจะมองเห็นดวงจันทร์มีขนาดปรากฏใหญ่กว่าดวงอาทิตย์ ทำให้ดวงจันทร์สามารถบดบังดวงอาทิตย์ได้ทั้งหมด เกิดเป็นสุริยุปราคาเต็มดวง โดยเส้นทางที่เงามืดของดวงจันทร์พาดผ่านบนผิวโลกนี้เรียกว่า Path of Totality และตลอดเส้นทางที่อยู่ภายใต้เงามืดของดวงจันทร์นี้จะสามารถมองเห็นปรากฏการณ์สุริยุปราคาเต็มดวงได้ โดยแต่ละจุดที่อยู่บนเส้นทางดังกล่าวจะมองเห็นสุริยุปราคาเต็มดวงในช่วงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น เนื่องจากเงาของดวงจันทร์เคลื่อนที่ไปค่อนข้างเร็ว

2.5.2 สุริยุปราคาบางส่วน (Partial eclipse)

เกิดจากตำแหน่งของโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันขณะเกิดสุริยุปราคา ทำให้มองเห็นเฉพาะเงามืดของดวงจันทร์ทอดผ่านพื้นโลก ณ บริเวณนั้น และภายในเงามืดนี้ ดวงอาทิตย์จะถูกดวงจันทร์บดบังไปเพียงบางส่วนเท่านั้น เราจึงมองเห็นดวงอาทิตย์มีลักษณะเว้าแหว่ง ปรากฏการณ์นี้ยังสามารถเห็นได้ตลอดตามเส้นทางที่เกิดสุริยุปราคาวงแหวนหรือสุริยุปราคาเต็มดวง

2.5.3 สุริยุปราคาวงแหวน (Annular eclipse)

เกิดจากการที่ดวงจันทร์มีวงโคจรค่อนข้างรี ดังนั้นดวงจันทร์จึงมีโอกาสอยู่ใกล้หรือไกลจากโลกได้ ถ้าเกิดสุริยุปราคาในช่วงที่ดวงจันทร์อยู่ตำแหน่งไกลจากโลก เราจะมองเห็นดวงจันทร์มีขนาดปรากฏเล็กกว่าดวงอาทิตย์ ทำให้ดวงจันทร์ไม่สามารถบดบังดวงอาทิตย์ได้ทั้งหมด จึงมองเห็นดวงอาทิตย์มีลักษณะเป็นวงแหวนสว่างเกิดเป็นสุริยุปราคาวงแหวน ถ้าเราอยู่นอกโลกและมองเหตุการณ์นี้ เราจะเห็นเงามืดของดวงจันทร์ทอดไปไม่ถึงโลกแต่จะเป็นเงา antumbra ที่ทอดไปถึงโลกแทน ส่วน

เส้นทางที่เงา antumbra พาดผ่านบนพื้นโลกเรียกว่า path of annularity และตลอดเส้นทางนี้เราจะเห็นสุริยุปราคาแบบวงแหวน

2.5.4 สุริยุปราคาผสม (Hybrid eclipse)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดสุริยุปราคาแบบเต็มดวงและสุริยุปราคาแบบวงแหวนในคราวเดียวกัน สาเหตุมาจากการที่โลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้มองเห็นขนาดปรากฏของดวงจันทร์และของดวงอาทิตย์มีขนาดเกือบเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันมาก ทำให้มีทั้งเงามืดและเงา antumbra ของดวงจันทร์ทอดลงบนพื้นโลก และ ณ บางตำแหน่งบนผิวโลก เราจะมองเห็นเป็นสุริยุปราคาเต็มดวง แต่ ณ บริเวณอื่น ๆ เราจะมองเห็นเป็นสุริยุปราคาวงแหวน ดังนั้นสุริยุปราคาแบบผสมจึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า annular-total eclipse

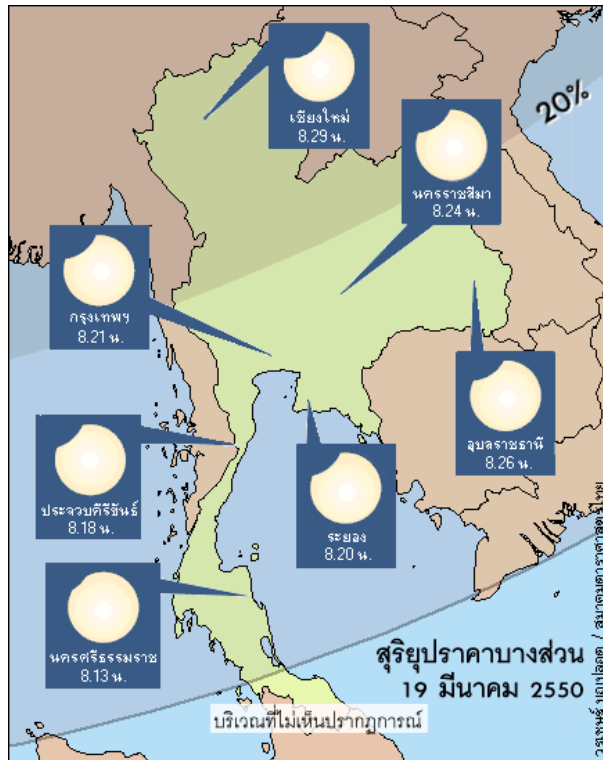
2.6 สุริยุปราคาที่สามารถมองเห็นได้ในประเทศไทย

ช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในชั้นบรรยากาศบริเวณประเทศไทย ตั้งแต่ที่ได้ทำการติดตั้งสถานีไอโอไอซอนด์ ในปี พ.ศ. 2546 มีการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาทั้งหมด 7 ครั้ง แต่ได้ทำการยกตัวอย่างสุริยุปราคาที่สามารถมองเห็นได้ในบริเวณประเทศไทยทั้งหมด 4 ครั้ง ดังนี้

2.6.1 สุริยุปราคาวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550

สุริยุปราคาในวันที่ 19 มีนาคม นี้เป็นสุริยุปราคาบางส่วน คือมีเงามืดของดวงจันทร์ไม่ได้ตกกระทบพื้นผิวโลก คงมีแต่เงามัวเท่านั้นที่พาดผ่านผิวโลก หากมองในภาพกว้างสุริยุปราคาครั้งนี้เริ่มต้นเวลา 7.38 น. ตามเวลาประเทศไทย เมื่อเงามัวของดวงจันทร์เริ่มแตะผิวโลกบริเวณนอกชายฝั่งด้านตะวันออกของอินเดีย จากนั้นเกิดสุริยุปราคามองเห็นดวงอาทิตย์แหว่งมากที่สุด (88%) ที่รัสเซียในเวลา 9.32 น. แล้วไปสิ้นสุดสุริยุปราคาในเวลา 11.25 น. ซึ่งเป็นจังหวะที่เงามัวหลุดออกจากผิวโลกในทะเลนอกชายฝั่งด้านทิศเหนือของอะแลสกา

สำหรับประเทศไทย สุริยุปราคาบางส่วนครั้งนี้มองเห็นได้เกือบทั่วประเทศยกเว้นจังหวัดชายแดนภาคใต้ บริเวณที่เห็นดวงอาทิตย์แหว่งมากที่สุดคือด้านตะวันตกเฉียงเหนือของภาคเหนือ ยิ่งอยู่ในละติจูดสูงมากเท่าใดก็ยิ่งเห็นดวงอาทิตย์แหว่งมากเท่านั้น ส่วนเวลาที่เกิดปรากฏการณ์ก็จะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ เช่น กรุงเทพฯ เห็นตั้งแต่เวลา 07.47-08.57 น. ดวงอาทิตย์แหว่งมากที่สุดในเวลา 08.21 น. ด้วยการบดบังสูงสุด 16% เชียงใหม่เห็นตั้งแต่เวลา 07:45-09:15 น. มีอัตราการบดบังสูงสุด 28% และชุมพร เห็นตั้งแต่เวลา 07:50-08:43 น. มีอัตราการบดบังสูงสุด 10% ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ.2550 [23]

2.6.2 สุริยุปราคาวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552

สุริยุปราคาครั้งนี้เกิดในช่วงสายของวันพุธที่ 22 กรกฎาคม ตามเวลาประเทศไทย เส้นทางสุริยุปราคาเต็มดวงเริ่มต้นที่อินเดีย ผ่านประเทศจีน เกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก เป็นสุริยุปราคาเต็มดวงนานกว่า 6 นาที ณ กึ่งกลางคราส เงามืดของดวงจันทร์เริ่มแตะผิวโลกตรงบริเวณชายฝั่งด้านทิศตะวันตกของประเทศอินเดียเมื่อเวลาประมาณ 07.53 น. ตามเวลาประเทศไทย จากนั้นเคลื่อนไปทางตะวันออกเฉียงใต้อย่างรวดเร็ว ผ่านพื้นที่บางส่วนของเนปาล บังกลาเทศ ภูฏาน และตอนเหนือสุดของพม่า เข้าสู่ประเทศจีน ผ่านเฉิงตูในมณฑลเสฉวน และเมืองใหญ่อย่างเซี่ยงไฮ้ เงามืดลงสู่ทะเลจีนตะวันออก ผ่านเกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และหมู่เกาะทางตอนเหนือของหมู่เกาะริวกิวซึ่งอยู่ทางใต้ของญี่ปุ่น แล้วเริ่มบ่ายหน้าลงไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ผ่านเกาะโอโอะชิมะ จุดที่เห็นสุริยุปราคาเต็มดวงนานที่สุดอยู่ในทะเลทางด้านตะวันออกของเกาะโอโอะชิมะด้วยระยะเวลา 6 นาที 39 วินาที โดยเกิดขึ้นในเวลา 09.29 น. ใกล้หมู่เกาะโอกะซะวะระ (หมู่เกาะโบนิน) ช่วงทำยของปรากฏการณ์ เงามืดผ่านเกาหลีใต้ ญี่ปุ่น และหมู่เกาะมาร์แชล ก่อนจะสิ้นสุดเส้นทางคราสในมหาสมุทรแปซิฟิกเมื่อเวลา 11.18 น. บริเวณที่เห็นสุริยุปราคาบางส่วนครอบคลุมส่วนใหญ่ของทวีปเอเชีย มหาสมุทรแปซิฟิก เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ยกเว้นทางใต้ของอินโดนีเซีย ประเทศไทยเห็นสุริยุปราคาครั้งนี้เป็นชนิดบางส่วนในเวลาประมาณ 07.00-09.00 น. ภาคเหนือและตอนบนของภาคอีสานเป็นพื้นที่ที่มีโอกาสเห็นดวงอาทิตย์แหวกเว้ามากที่สุด ดังรูปที่ 2.16

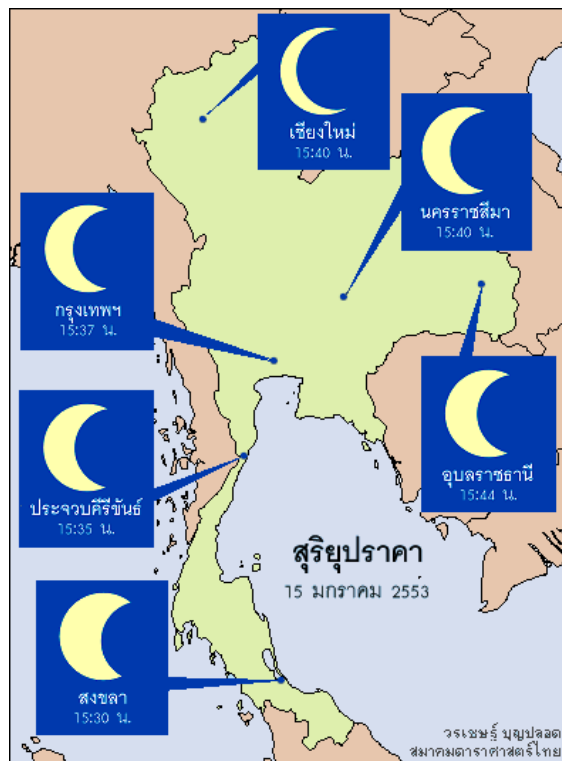


รูปที่ 2.16 ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ.2552 [24]

2.5.3 สุริยุปราคาวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553

สุริยุปราคาเกิดขึ้นในปลายวันศุกร์ที่ 15 มกราคม 2553 ตามเวลาในประเทศไทย ดวงจันทร์อยู่ห่างจากโลกจนมีขนาดปรากฏเล็กกว่าดวงอาทิตย์มากจึงเกิดเป็นสุริยุปราคาวงแหวน เส้นทางคราสวงแหวนผ่านทวีปแอฟริกา มหาสมุทรอินเดีย ทางใต้ของประเทศอินเดีย ศรีลังกา พม่า บังกลาเทศ และจีน สุริยุปราคาเริ่มขึ้นเมื่อเงามัวของดวงจันทร์แตะผิวโลกในเวลา 11:05 น. ตามเวลาประเทศไทย จากนั้นเงาคราสวงแหวนเริ่มสัมผัสผิวโลกเวลา 12:14 น. ทางตะวันตกของสาธารณรัฐแอฟริกากลาง เงาเคลื่อนตัวไปทางตะวันออกอย่างรวดเร็ว เข้าสู่สาธารณรัฐประชาธิปไตยคองโก ผ่านยูกันดา ชีกด้านเหนือของทะเลสาบวิกตอเรีย เคนยา ส่วนเล็ก ๆ ทางเหนือของแทนซาเนีย และทางใต้ของโซมาเลีย ก่อนลงสู่มหาสมุทรอินเดีย เมืองบังกีในสาธารณรัฐแอฟริกากลางเห็นสุริยุปราคาวงแหวนนาน 3 นาที 57 วินาที โดยดวงอาทิตย์มีมุมเงย 4 องศา กัมปาลาในยูกันดาเห็นสุริยุปราคาวงแหวนนาน 7 นาที 38 วินาที ส่วนที่เมืองไนโรบีของเคนยาเห็นสุริยุปราคาวงแหวนนาน 6 นาที 52 วินาที กึ่งกลางคราสซึ่งเห็นสุริยุปราคาวงแหวนเกือบนานที่สุดอยู่ในมหาสมุทรอินเดียถึง 11 นาที 8 วินาที เกิดขึ้นเวลา 14:07 น. นับเป็นสุริยุปราคาวงแหวนที่ยาวนานที่สุดในคริสต์สหัสวรรษที่ 3 เงาคราสวงแหวนพาดผ่านหมู่เกาะมัลดีฟส์ เมืองมาเลเห็นสุริยุปราคาวงแหวนนานถึง 10 นาที 46 วินาที จากนั้นถึงทางใต้ของอินเดียและตะวันตกเฉียงเหนือของศรีลังกา เมืองจาฟนาของศรีลังกาซึ่งอยู่ใกล้เส้นกลางคราสเห็นสุริยุปราคาวงแหวนนาน

10 นาที 9 วินาที เงามกราสมุ่งหน้าสู่อ่าวเบงกอล ผ่านพม่า ส่วนเล็ก ๆ ทางตอนล่างของบังกลาเทศกับอินเดียตะวันออก มืดทะเลย์เกิดสุริยุปราคาวงแหวนนาน 7 นาที 37 วินาที จากนั้นเข้าสู่ประเทศจีน ฉงชิ่งเห็นสุริยุปราคาวงแหวนนาน 7 นาที 50 วินาที เจิ้งโจว 4 นาที 40 วินาที คราสวงแหวนสิ้นสุด บริเวณแหลมซานตงในเวลา 15:59 น. จากนั้นปรากฏการณ์สิ้นสุดเมื่อเงามัวหลุดออกจากผิวโลกในเวลา 17:08 น. บริเวณที่เห็นสุริยุปราคาบางส่วนซึ่งเงามัวของดวงจันทร์พาดผ่านครอบคลุมส่วนใหญ่ของทวีปเอเชีย แอฟริกา บางส่วนทางตะวันออกของยุโรป มหาสมุทรอินเดีย สำหรับประเทศไทยสามารถสังเกตสุริยุปราคาครั้งนี้ได้ทั่วประเทศทุกภาคโดยภาคเหนือตอนบนเห็นดวงอาทิตย์แหวกมากกว่าภาคอื่น ๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.17



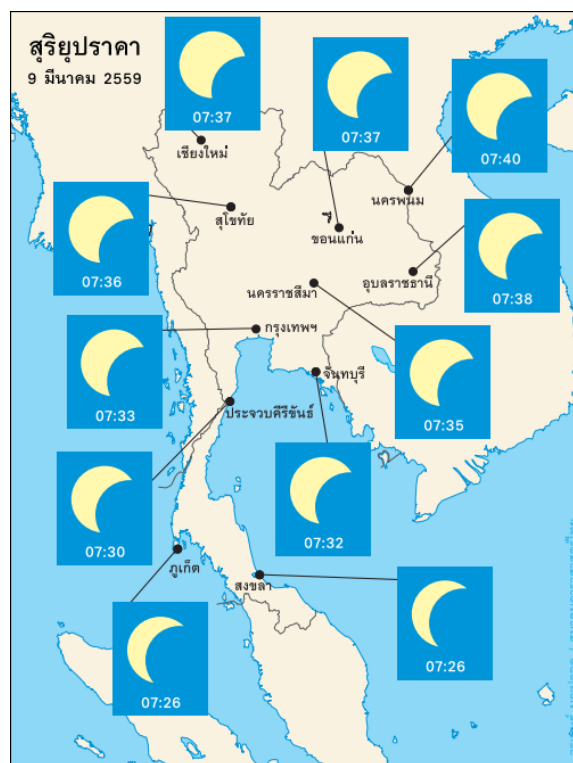
รูปที่ 2.17 ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 15 มกราคม พ.ศ.2553 [25]

2.5.4 สุริยุปราคาวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559

เช้าวันพุธที่ 9 มีนาคม 2559 จะเกิดสุริยุปราคาที่จะเห็นได้ในประเทศไทย เป็นสุริยุปราคาครั้งแรกในรอบ 4 ปี สำหรับประเทศไทย นับจากสุริยุปราคาบางส่วนเมื่อเช้าวันที่ 21 พฤษภาคม 2555 เริ่มเกิดตั้งแต่เช้าตรู่ และดำเนินไปจนถึงช่วงสายของวัน โดยดวงอาทิตย์แหวกเล็กที่สุดในเวลาประมาณ 7 โมงครึ่ง สุริยุปราคาเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นเป็นประจำทุกปี เมื่อดวงอาทิตย์ ดวงจันทร์ และโลก เรียงอยู่ในแนวเดียวกัน ทำให้เงาดวงจันทร์พาดผ่านผิวโลก ผู้ที่อยู่ใต้เงามองเห็นดวงจันทร์บังดวงอาทิตย์ เงาดวงจันทร์แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เงามืดและเงามัว ดวงจันทร์โคจร

รอบโลกเป็นวงรี หากดวงจันทร์อยู่ใกล้โลกจนเงามืดทอดยาวมาถึงผิวโลก ผู้ที่อยู่ใต้เงามืดจะเห็นดวงจันทร์บังดวงอาทิตย์มืดหมดทั้งดวง เรียกว่าสุริยุปราคาเต็มดวง ทำให้ท้องฟ้ามืดสลัวลงคล้ายเวลาพลบค่ำ และมองเห็นบรรยากาศชั้นคอโรนาของดวงอาทิตย์ เงามืดกบบนผิวโลกครอบคลุมพื้นที่กว้างใหญ่กว่าเงามืดมาก เป็นบริเวณที่เห็นดวงอาทิตย์ถูกดวงจันทร์บังเพียงบางส่วน ที่เรียกว่าสุริยุปราคาบางส่วน ไม่สามารถมองดูด้วยตาเปล่าได้ เนื่องจากแสงอาทิตย์สว่างเจิดจ้าจนเป็นอันตรายต่อดวงตา

สุริยุปราคาในวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559 เป็นสุริยุปราคาเต็มดวงแต่พื้นที่ซึ่งสามารถมองเห็นสุริยุปราคาเต็มดวงอยู่ภายในแถบแคบ ๆ ลากผ่านด้านตะวันออกของมหาสมุทรอินเดีย อินโดนีเซีย และมหาสมุทรแปซิฟิก ประเทศไทยอยู่นอกแนวดังกล่าว แต่อยู่ภายในเขตที่เงามืดพาดผ่าน จึงเห็นสุริยุปราคาครั้งนี้เป็นสุริยุปราคาบางส่วน



รูปที่ 2.18 ดวงอาทิตย์ที่มองเห็นได้จากที่ต่าง ๆ ในวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ.2559 [26]

บทที่ 3

วิธีการศึกษาผลการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

การศึกษากการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เวลาต่าง ๆ กัน ได้ทำการเก็บข้อมูลเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานีคือ สถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย โดยในการเก็บข้อมูลใช้เครื่องส่งและเครื่องรับคลื่นในย่าน HF ผ่านสายอากาศ โดยเครื่องรับจะทำการเก็บข้อมูลเป็นภาพไอโอโนแกรมไว้ในคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Special scaling เพื่อนำภาพไอโอโนแกรมนี้มาทำการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 และยังศึกษากการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศในช่วงเวลาที่สามารถมองเห็นสุริยุปราคาได้ในประเทศไทย ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่ปีเดือนมกราคม พ.ศ.2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2561 โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 ในเวลาที่ต่าง ๆ กัน

3.1.1 เครื่องส่งและเครื่องรับ

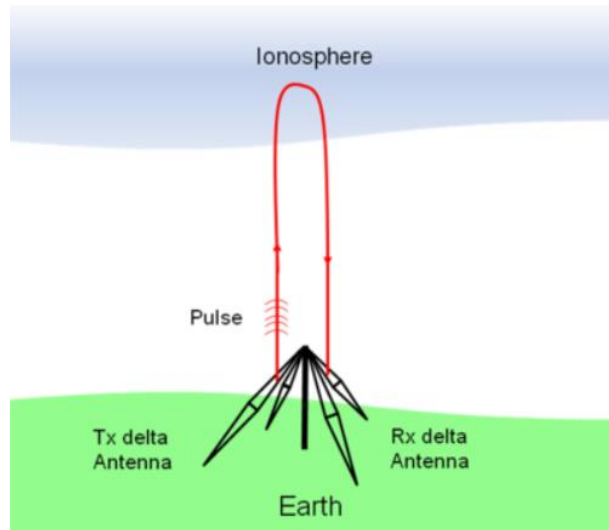
เครื่องส่งและเครื่องรับเป็นรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar ทำการส่งและรับคลื่นสัญญาณในย่านความถี่ตั้งแต่ 2-30 MHz กำลังสูงสุดในการส่ง 20 วัตต์และมีอัตราการเพิ่มความถี่ 100 MHz/s ซึ่งในแต่ละรอบของการทำงานจะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาที จากนั้นจะส่งข้อมูลซึ่งเป็นภาพไอโอโนแกรมไปทำการบันทึกที่คอมพิวเตอร์แล้วจะทำการปรับสัญญาณนาฬิกา (Clock) ของเครื่องใหม่ในทุก ๆ รอบของการทำงานโดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรมที่สถานี ในทุก ๆ ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.1



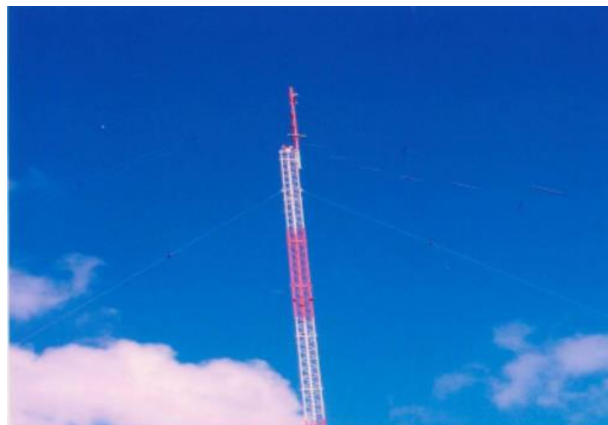
รูปที่ 3.1 เครื่องส่งและเครื่องรับเป็นรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar [12]

3.1.2 สายอากาศที่ใช้งาน

เป็นสายอากาศชนิดโพลเด็ตไดโพล (Folded dipole) 2 ชั้นวางตัดขวางกันเป็นโคมโดยใช้เสาที่มีความสูงพอที่จะหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง โดยเสานี้ยังมีความสูงมากก็จะยิ่งดี โดยการติดตั้งสายอากาศชั้นแรกที่ทำกรส่งคลื่นขึ้นไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์จะวางตั้งฉากกับสายอากาศชั้นที่สองที่ทำการรับคลื่นที่สะท้อนลงมาถึงพื้นโลก



รูปที่ 3.2 สายอากาศชนิดโพลเด็ตไดโพล [28]



รูปที่ 3.3 สายอากาศที่สถานีชุมพร ประเทศไทย [12]

3.1.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลมีจำนวน 1 เครื่องโดยทำการติดตั้งไว้ที่สถานีไอโอโนซอนด์ในพื้นที่ต่าง ๆ และเพื่อนำข้อมูลที่ได้อ่านมาเครื่องรับแล้วมาทำการสร้างเป็นภาพไอโอโนแกรม

โดยมีการเก็บภาพเป็นไฟล์ .PNG จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์อีก 1 เครื่องที่ติดตั้งไว้ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังในการทำการดึงข้อมูลไฟล์ภาพไอโอโนแกรมที่บันทึกได้ในสถานีต่าง ๆ ออกมา เพื่อที่จะทำการเก็บค่าและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ โดยการใช้โปรแกรม Special scaling ในการเก็บค่าข้อมูลที่ได้มา และในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 ในเวลาที่ต่าง ๆ กัน



รูปที่ 3.4 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลภาพไอโอโนแกรม [28]

3.2 สถานีที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

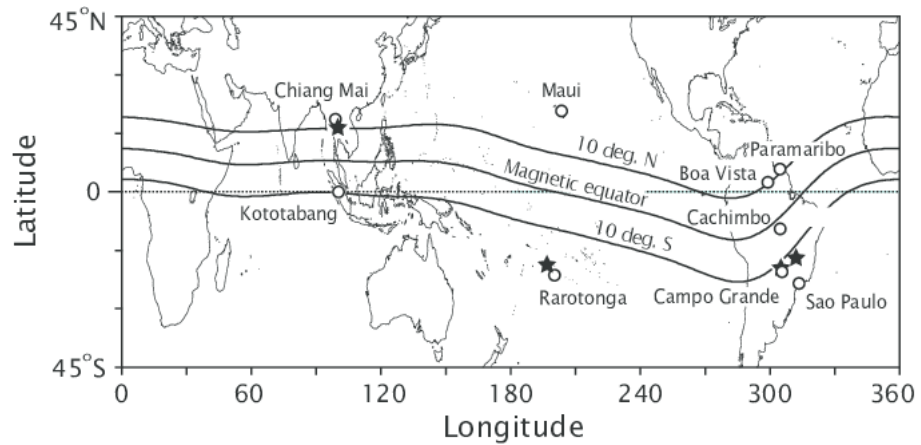
สถานีที่ใช้ในการเก็บข้อมูลได้จัดตั้งจากองค์กร National Institute of Information and Communications Technology (NICT), ประเทศญี่ปุ่น โดยได้ติดตั้งสถานีในบริเวณต่าง ๆ ชื่อ SEALION is an ionospheric observation network in Southeast Asia วัตถุประสงค์เพื่อเก็บค่าการตรวจสอบและศึกษาการรบกวนอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้บริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานีคือ

3.2.1 สถานีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย (Chumphon : CPN) ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ

3.2.2 สถานีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย (Chiang Mai : CMU) ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 12.7 องศาเหนือ

3.2.3 สถานีสถาบันการบินและอวกาศแห่งชาติ (LAPAN) โกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย (Kototabang : KTB) ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก -10.1 องศาเหนือ

โดยที่ทั้ง 3 สถานีติดตั้งในบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่เหนือและใต้ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา สำหรับในโลกมีพื้นที่บริเวณประเทศบราซิลและประเทศไทยที่สามารถวางอุปกรณ์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศในบริเวณนี้ได้ ดังรูปที่ 3.5

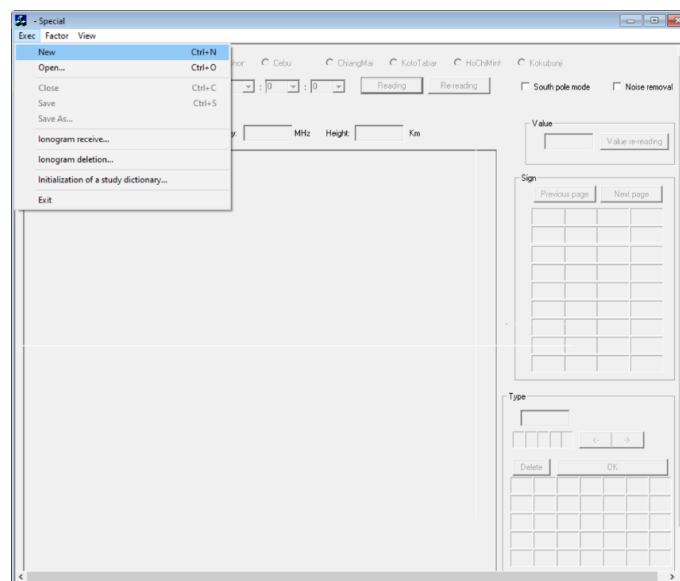


รูปที่ 3.5 แผนที่โลกที่ทำการติดตั้งบริเวณ EIA [32]

3.3 วิธีการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรม

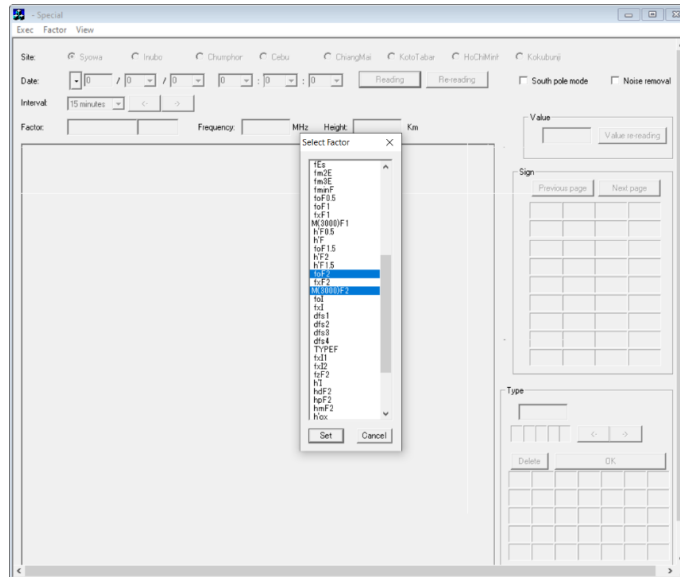
3.3.1 การใช้โปรแกรม Special Scaling มีวิธีใช้งาน ดังนี้

- 1) ทำการเปิดโปรแกรม special-10C-2000-eng.exe แล้วกด New ดังรูปที่ 3.6



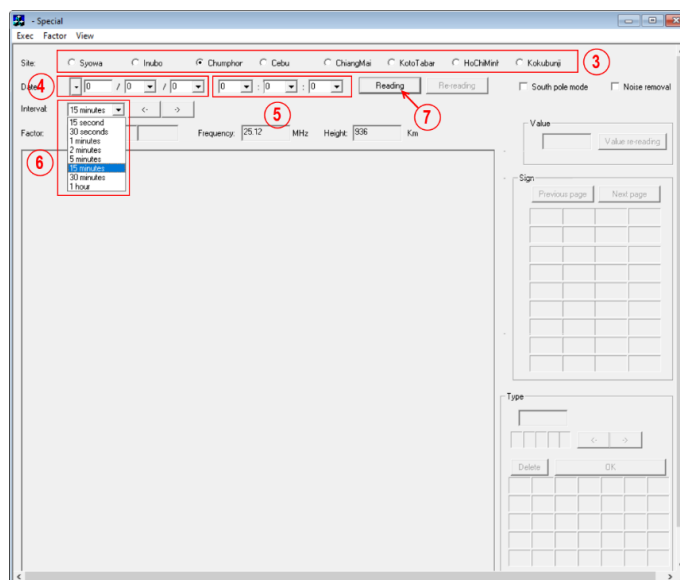
รูปที่ 3.6 หน้าแรกของโปรแกรม Special Scaling

- จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง Select Factor แล้วทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการเก็บ ได้แก่ foF2 และ MUF(3000)F2 ดังรูปที่ 3.7



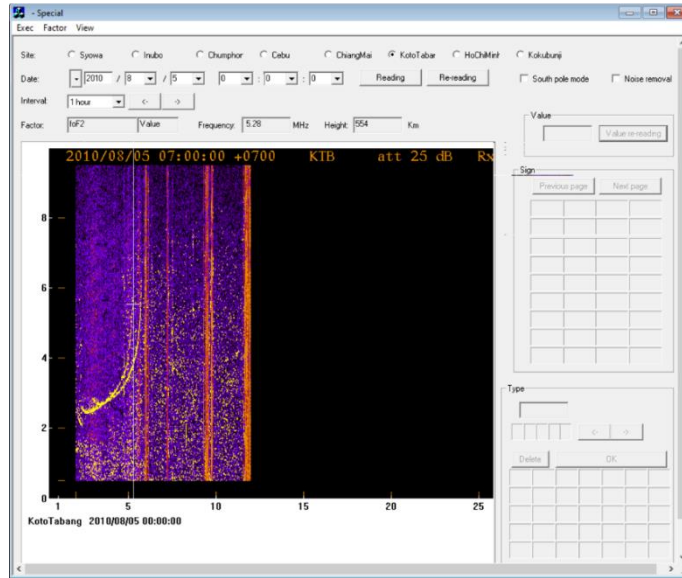
รูปที่ 3.7 การเลือกค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม Special Scaling

- จากนั้นทำการเลือกสถานที่ที่ต้องการเก็บข้อมูล
- ทำการเลือกวันที่ เดือน ปี ที่ต้องการเก็บข้อมูล

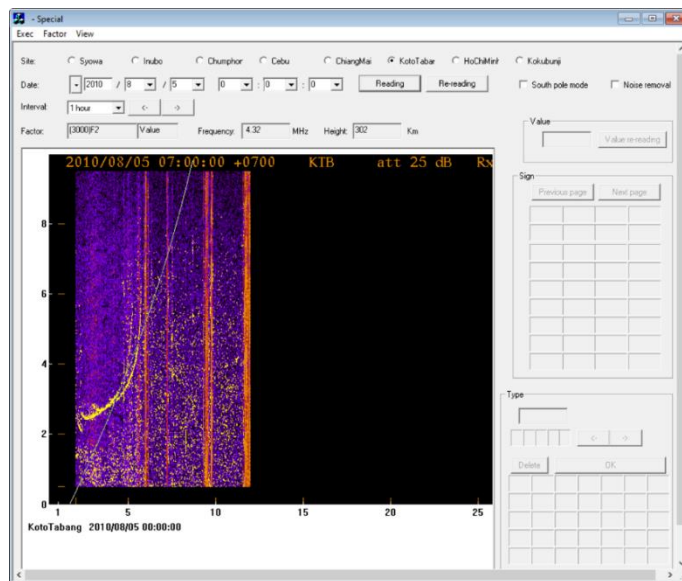


รูปที่ 3.8 การเลือกวันที่ เดือน ปี และเวลาจากโปรแกรม Special Scaling

- 5) ทำการเลือกเวลาที่ต้องการเริ่มต้นเก็บข้อมูลโดยเลือกค่า Start 0:0:0 (07.00 LT)
- 6) ทำการเลือกช่วงเวลาที่ต้องการข้อมูล โดยเลือกได้ตั้งแต่ทุก ๆ 5 นาที ถึง 1 ชั่วโมง
- 7) จากนั้นกด Reading เพื่อทำการอ่านค่า โดยแสดงดังรูปที่ 3.8
- 8) ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทำการเลือกคือ foF2 และ MUF(3000)F2 ดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 โดยวิธีการเก็บค่าจะกล่าวในหัวข้อถัดไป (3.3.2)



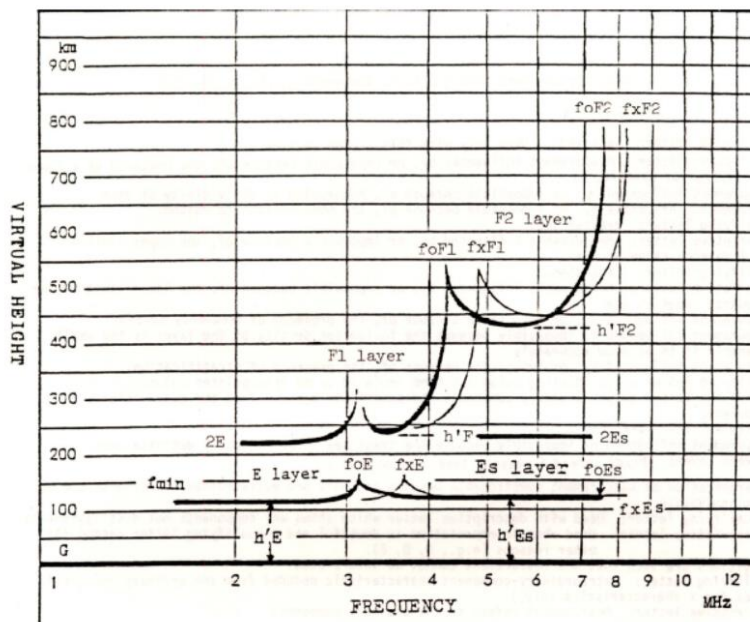
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการวัดค่าพารามิเตอร์ foF2 จากโปรแกรม Special Scaling



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 จากโปรแกรม Special Scaling

3.3.2 ภาพจำลองการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ภาพไอโอโนแกรมที่จากการเก็บค่าจากสถานีไอโอโนซอนด์สามารถทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้จากรูปที่ 3.11 โดยการเก็บค่าพารามิเตอร์สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Special Scaling ตามหัวข้อที่ 3.3.1



รูปที่ 3.11 ภาพจำลองการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากไอโอโนแกรม [12]

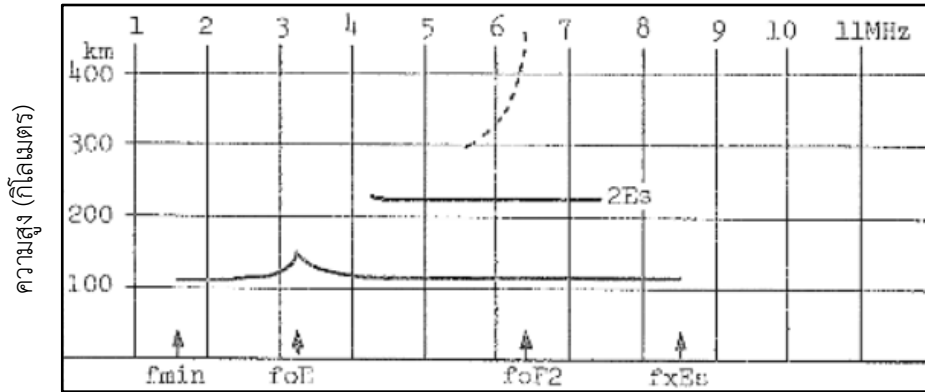
โดยที่ชั้น E จะประกอบไปด้วยตัวแปรต่าง ๆ คือ ความสูงของชั้น E ($h'E$), ความสูงของชั้น Es ($h'Es$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น E (foE), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น Es ($foEs$), ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น E (fxE) และความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น Es ($fxEs$)

ส่วนในชั้น F จะประกอบด้วย ความสูงชั้น F1 ($h'F1$), ความสูงชั้น F2 ($h'F2$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F1 ($foF1$), ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F1 ($fxF1$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F2 ($foF2$) และความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F2 ($fxF2$) ตามลำดับ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ $foF2$, $M(3000)F2$ และ $NmF2$ ในเวลาที่ต่าง ๆ กัน ซึ่งตัวอย่างการเก็บค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว โดยใช้คู่มือที่แสดงได้ดังต่อไปนี้

3.3.2.1 การเก็บค่าพารามิเตอร์ $foF2$

ความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ชั้น F2 หรือในทางสากลจะใช้สัญลักษณ์ $foF2$ โดยมีประโยชน์ใช้ในการสื่อสารวิทยุทางไกล นอกจากนั้นยังสามารถใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ที่ใช้งานได้ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตรและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดอีกด้วย โดยที่ค่าความถี่

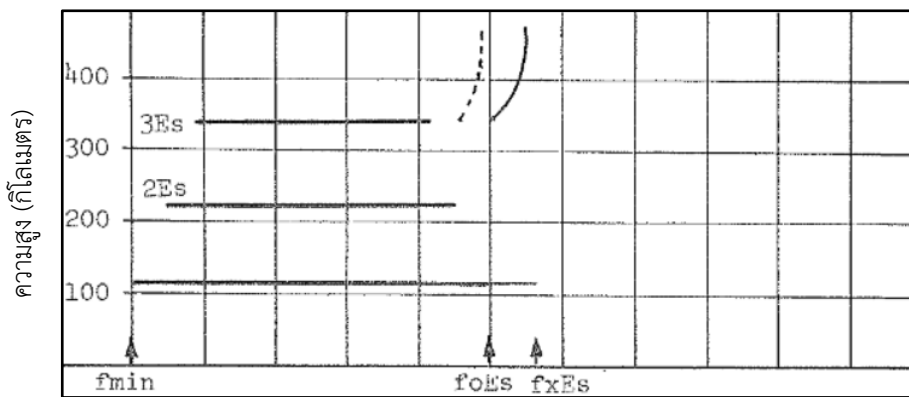
วิกฤตของชั้น F2 สามารถวัดได้จากส่วนโค้งส่วนแรกที่ตั้งฉากกับแนวนอนของไอโอโนแกรม โดยมีตัวอย่างการเก็บค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ดังนี้



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.12 ค่าความถี่ของชั้น F2 ไม่สามารถอ่านค่าได้เนื่องจากการคลุมด้วยค่าความถี่ของชั้น Es

จะเห็นว่าค่าของ $f_x E_s$ มีการสะท้อนทั้งหมด 2 ครั้งและมีค่ามากที่สุดที่ 8.5 MHz เนื่องจากค่าความถี่วิกฤต $f_o F_2$ ของชั้น F2 ถูกชั้น Es ครอบคลุมทั้งหมด ทำให้ค่าความถี่วิกฤต $f_o F_2$ ที่อ่านได้จากภาพไอโอโนแกรมนี้ จะมีค่าที่น้อยกว่ากับค่าความถี่วิกฤต $f_o E_s$ ของชั้น Es ซึ่งในกรณีนี้ถูกเกิดการรวมตัวของชั้น F และชั้น Es ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนด้วย A ดังนั้นค่าของ $f_o F_2 = A$

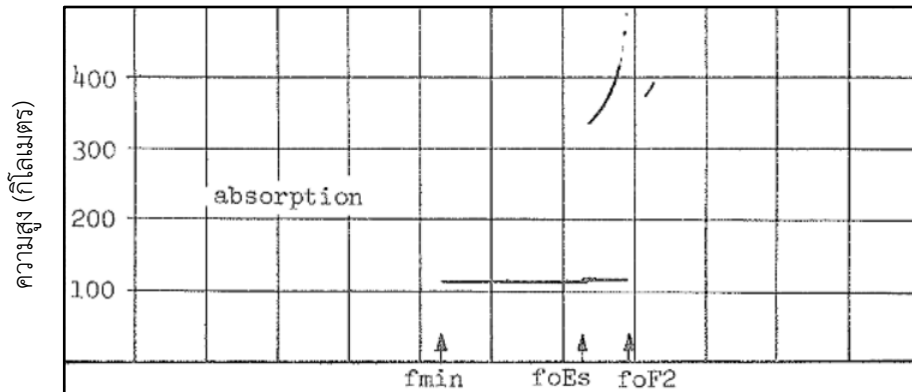


ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.13 การแพร่กระจายของค่าความถี่ของชั้น F2 เนื่องจากการคลุมด้วยค่าความถี่ของชั้น Es

จะเห็นว่าค่าของ $f_o E_s$ มีความเข้มข้นมากจนเกิดการแพร่กระจายออกเป็น 2 เส้น ซึ่งในกรณีนี้เราจะอ่านที่ได้จากการเกิดครั้งแรก โดยมีค่าความถี่วิกฤตของชั้น Es หรือ $f_o E_s = 6$ MHz ซึ่งค่าความถี่วิกฤตของชั้น F ที่มีค่าสูงกว่า 6 MHz จะเกิดจากการสะท้อนตามลำดับของภาพไอโอโนแกรม ซึ่งทำให้ค่าความถี่วิกฤต $f_o F_2$ ที่สามารถหาได้จากค่า $f_x F_2$ จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย J และใช้ตัวอักษร

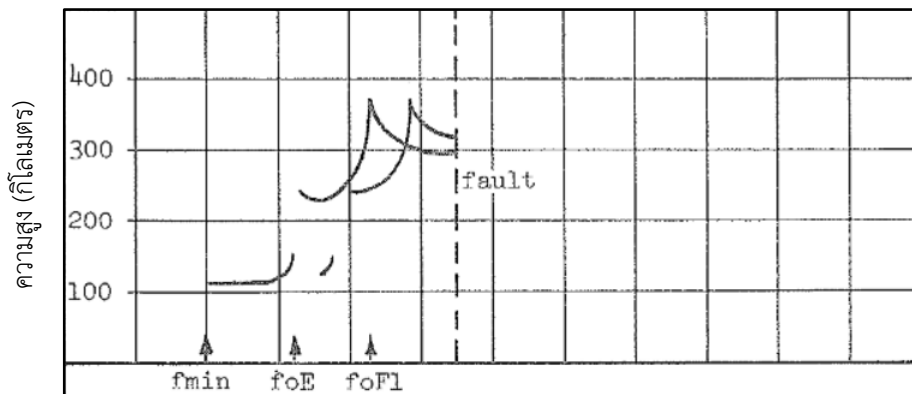
A เพื่อแทนสัญญาณรบกวน โดยมีค่าเท่ากับ $foF2 = (fxF2 - fb/2)JA = 5.9JA$ MHz เมื่อค่า $foF2$ หาค่ามาจาก $fxF2$ และมีค่ามากกว่า $foEs$ ในกรณีเช่นนี้อาจจะใช้ตัวอักษร S หรือ R แทนตัวอักษร A ก็ได้



ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

รูปที่ 3.14 การจางหายของค่าความถี่ส่วนล่างเนื่องจากการดูดซึม

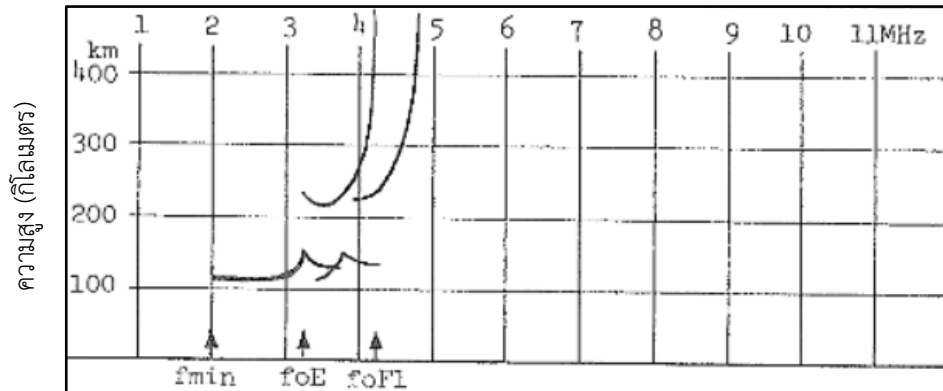
จะเห็นได้ว่าก่อนหน้าค่า 5.3 MHz ไม่มีผลของการบันทึกภาพจากไอโอโนแกรม ส่งผลทำให้ค่า $f_{min} = 5.3$ MHz เนื่องจากการดูดซึมพลังงานที่รุนแรงซึ่งมีผลทำให้ค่า f_{min} สูง จากรูปทำให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่า $foF2 = (foF2)R = 7.9R$ MHz



ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

รูปที่ 3.15 การจางหายของค่าความถี่ส่วนบนเนื่องจากความผิดปกติของสถานีไอโอโนซอนด์

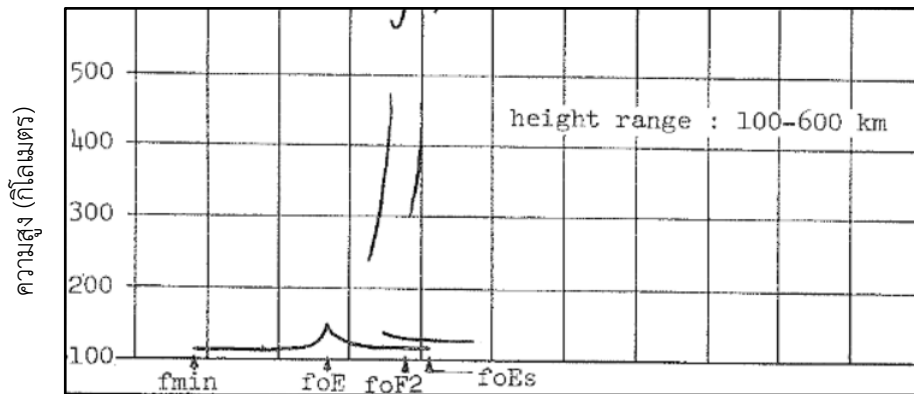
จะเห็นได้ว่าค่าความถี่วิกฤตของชั้น F1 จะมีค่าส่วนที่ขาดหายไปในช่วง 5.5 MHz โดยเกิดจากความผิดปกติการเก็บค่าของสถานีไอโอโนซอนด์ ดังนั้นค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ $foF2$ ถึงถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ C ส่งผลทำให้ค่า $foF2 = C$ ซึ่งจะมีความแตกต่างกับการให้สัญลักษณ์ S หรือการแทรกสอดของสัญญาณ (Interference)



ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

รูปที่ 3.16 ไม่มีการบันทึกค่าความถี่ foF2 เนื่องจากเกิดการรบกวนของพายุแม่เหล็ก

จะเห็นว่าค่าของชั้น F บนไอโอโนแกรมมีค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ลดลงจนมีค่าเท่ากับหรืออาจจะน้อยกว่าความถี่วิกฤตของชั้น F1 เนื่องจากเกิดการรบกวนของพายุแม่เหล็กบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยแทนด้วยสัญลักษณ์ EG (E คือมีค่าน้อยกว่า) ดังนั้นค่าของ foF2 = (foF1)EG = 4.2EG MHz

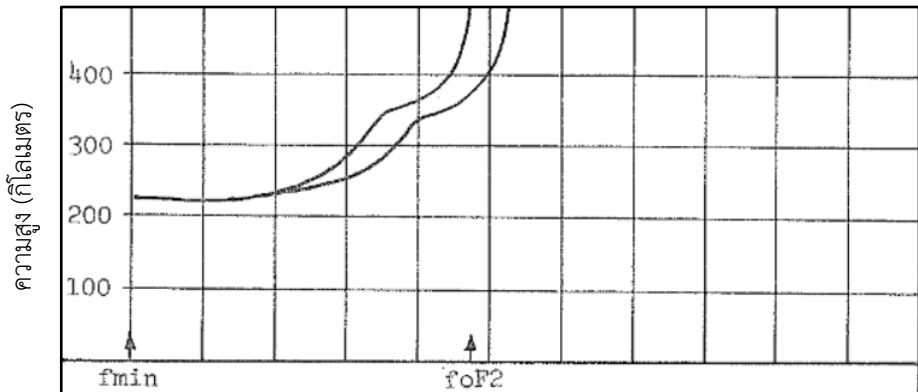


ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

รูปที่ 3.17 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่ foF1 มาก

จะเห็นว่าค่าความสูงของชั้น F2 มีค่าที่ประมาณ 560 กิโลเมตรและมีการดูดซับภายในชั้น F1 ทำให้มีค่าความถี่วิกฤต foF1 = 4.6 MHz กล่าวคือตัวอย่างไอโอโนแกรมของรูปนี้ จะเกิดหลังจากรูปไอโอโนแกรมของรูปที่ 3.16 ซึ่งส่งผลให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ foF2 = 4.7 MHz และเมื่อค่าความถี่วิกฤต foF2 มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่วิกฤต foF1 จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย G ในทาง

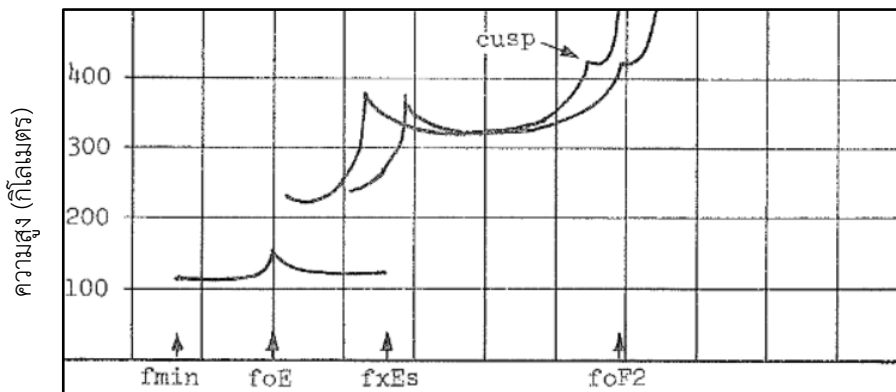
เดียวกันเมื่อค่าความสูงมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเกิดจากการแปรผันของความถี่ใช้สัญลักษณ์แทนด้วย W ตามลำดับ



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.18 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 สามารถอ่านค่าได้อย่างชัดเจน

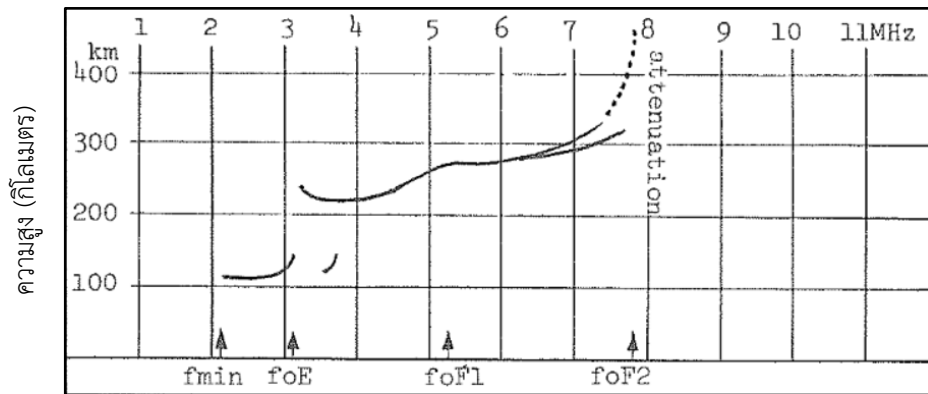
จะเห็นได้ว่ารูปนี้เป็นตัวอย่างการแสดงรูปไอโอโนแกรมในช่วงเวลากลางคืน โดยในรูปนี้จะเห็นค่าความถี่วิกฤตและค่าความสูงของชั้น F2 ได้อย่างชัดเจน และคาดว่าจะไม่มีผลกระทบต่อความแม่นยำในค่าที่อ่านได้ จึงถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ H ดังนั้นค่าความถี่วิกฤต foF2 = 5.7H MHz



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.19 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดการผิดปกติหรือมีรอยหยักชั่วคราว

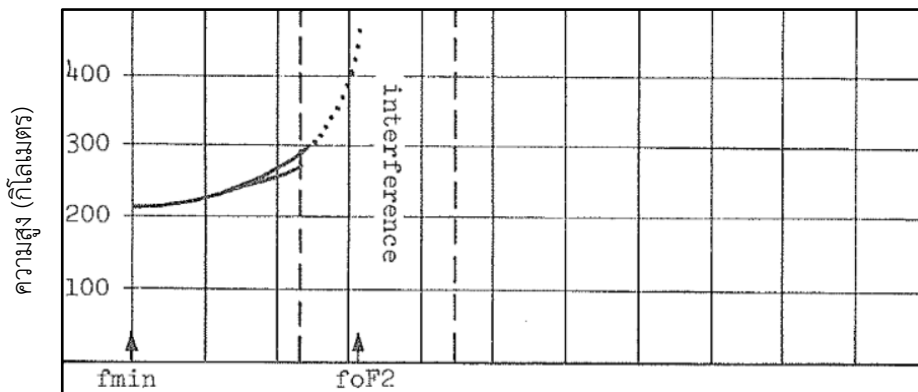
จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมนี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน โดยรูปนี้จะเกิดการผิดปกติ คือมีรอยหยัก (Cusp) ที่บริเวณค่าความถี่ 7.4 MHz ของชั้น F2 ส่งผลให้ค่าความถี่ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงมาชั่วคราว จะใช้สัญลักษณ์ H แทนค่า โดยจากรูปจะมีค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ foF2 = (foF2)H = 7.9H MHz



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.20 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดการลดทอน (Attenuation)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมรูปนี้ มีค่าที่เกิดจากการผิดพลาดของภาพไอโอโนแกรมที่เครื่องรับ ทำให้ไม่สามารถบันทึกค่าความถี่วิกฤตได้ทั้งหมด โดยจะมีค่าการลดทอน (Attenuation) อยู่ที่ประมาณ 7.4 MHz และ 7.7 MHz เนื่องจากค่าความถี่วิกฤต foF2 ของชั้น F2 โดยประมาณการจะเกิดการขยายแตกต่างกัน 5% และมีความถี่สูงสุดที่บันทึกได้คือ 7.4 MHz จะใช้สัญลักษณ์ U และ R แทนค่าการดูกลับเมื่อเกิดสัญญาณลดทอน ส่งผลให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าประมาณ $foF2 = (foF2)_{UR} = 7.8_{UR}$ MHz

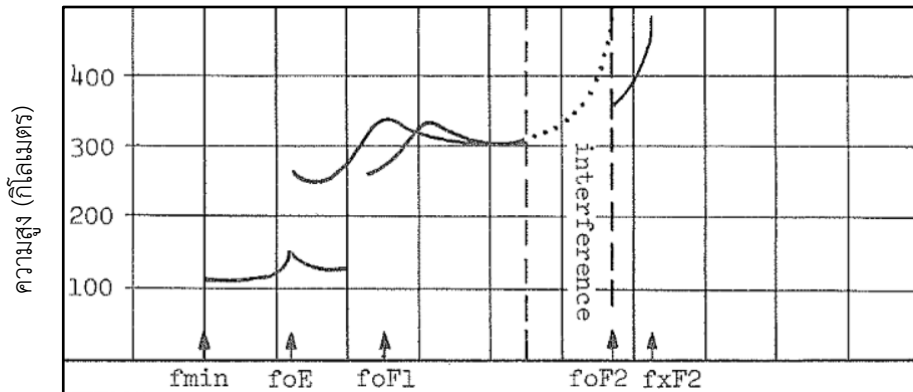


ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.21 ค่าของความถี่วิกฤต foF2 เกิดสัญญาณรบกวน (Interference)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมตัวอย่างรูปนี้ จะเกิดขึ้นในช่วงเวลากลางคืน และเกิดสัญญาณรบกวน (Interference) ส่งผลค่าความถี่วิกฤตที่ต่ำสุดก่อนเกิดสัญญาณรบกวนคือ 3.3 MHz จนถึงช่วงที่หายไปคือ 4.1 MHz หากปริมาณค่าแตกต่างของทั้ง 2 ค่า ($4.1 - 3.3 = 0.8$ MHz) ไม่เกิน 20% ของค่าความถี่วิกฤต foF2 ใช้สัญลักษณ์ D แทนความคลาดเคลื่อนและ S แทนการแทรกสอดของสัญญาณ

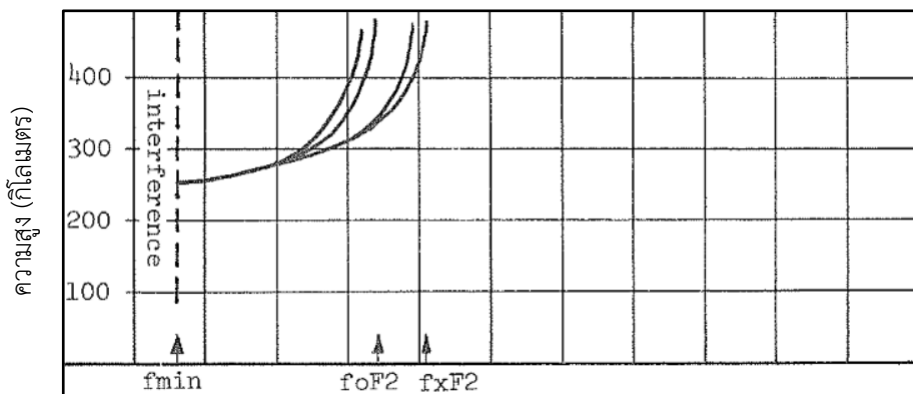
ส่งผลทำให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ $foF2 = 3.3DS$ MHz หากปริมาณค่าแตกต่างระหว่าง 2 ค่าเกิน 20% จะใช้เฉพาะสัญลักษณ์ S เนื่องจากไม่สามารถอ่านค่าได้ส่งผลให้ค่า $foF2 = S$



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.22 ค่าของความถี่วิกฤต $foF2$ เกิดสัญญาณรบกวนของสัญญาณส่วนบน

จะเห็นได้ว่ารูปตัวอย่างไอโอโนแกรมรูปนี้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณทำให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ในช่วง 6.5 MHz ถึง 7.7 MHz มีลักษณะไม่ชัดเจน ในขณะที่สังเกตเห็นค่าความถี่ของชั้น E และชั้น F1 ได้อย่างชัดเจน โดยจะใช้สัญลักษณ์ S แทนการแทรกสอดของสัญญาณ และสัญลักษณ์ J แทนการประมาณค่าของความถี่ชั้น F2 ส่งผลให้ค่า $foF2 = (fxF2 - fB/2)JS = 7.7JS$ MHz

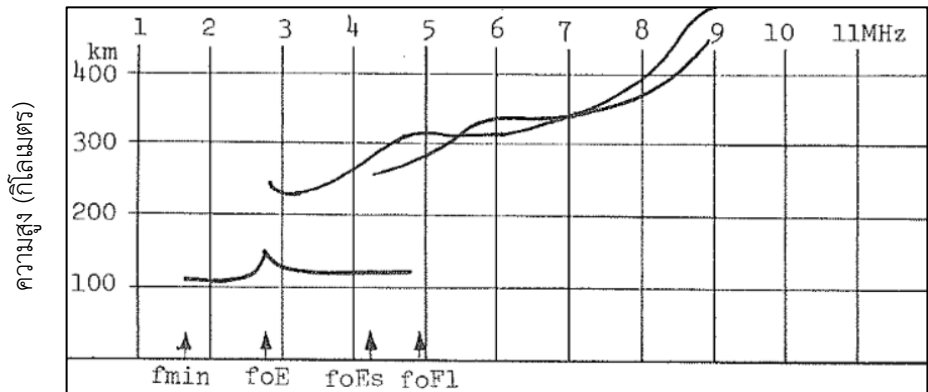


ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.23 ค่าของความถี่วิกฤต $foF2$ มีลักษณะเป็นง่าม (Fork)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมนี้จะมีค่าความถี่ F2 มีลักษณะเป็นง่าม (Fork) โดยที่ความถี่จะประกอบด้วยส่วนความถี่สามัญ (Ordinary) และความถี่สามัญพิเศษ (Extraordinary) ที่มีช่วงความถี่ 2 ช่วงคือ 4.4 MHz และ 5.1 MHz และอีกคู่คือ 4.2 MHz และ 4.8 MHz ตามลำดับ โดยคู่ที่มีความถี่ที่สูง

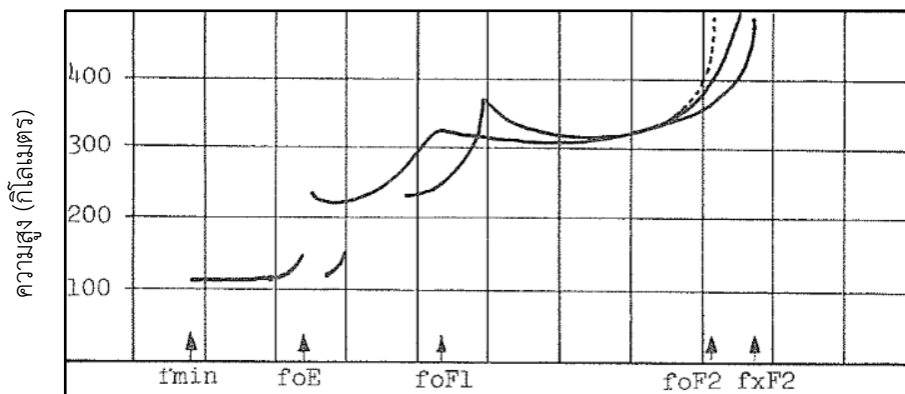
กว่าจะใช้ในการอ่านค่า และแทนด้วยสัญลักษณ์ V เพื่อแสดงถึงการเกิดค่าความถี่วิกฤตที่มีลักษณะเป็น
ง่าม ดังนั้นค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ $foF2 = (foF2)V = 4.4V$ MHz



ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

รูปที่ 3.24 ค่าของความถี่วิกฤต $foF2$ มีขนาดรูปร่างผิดปกติสะท้อนจากทิศทางแนวเฉียง

จะเห็นได้ว่าค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 มีค่าสูงกว่า 8 MHz และมีเส้นโค้งบริเวณความถี่
ประมาณ 9 MHz มีขนาดรูปร่างผิดปกติ ถ้าความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นสะท้อนจากทิศทางแนวเฉียง ไม่ได้
สะท้อนมาจากแนวตั้งฉากกับพื้นโลก จะใช้สัญลักษณ์ E และ Y แทนการเอียงของความถี่ ส่งผลให้
ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ $foF2 = 9.0EY$ MHz

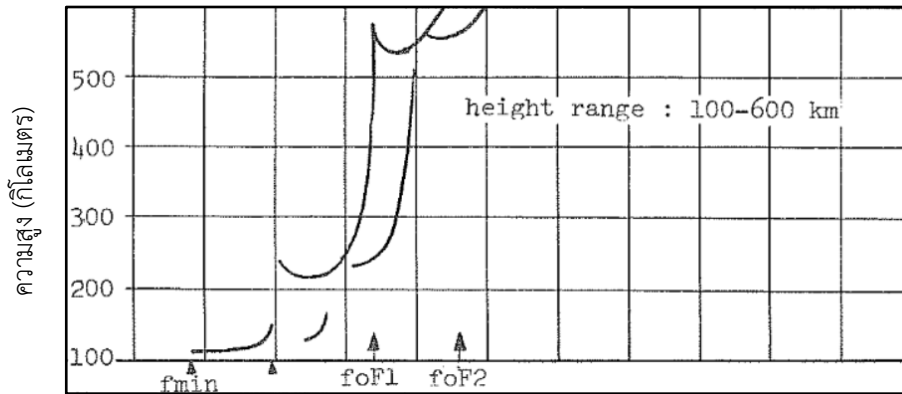


ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

รูปที่ 3.25 ค่าของความถี่วิกฤตชั้น F1 และ F2 มีความผิดปกติหรือเกิดรอยหยัก

จะเห็นได้ว่าส่วนประกอบของความถี่ชั้น F1 และ F2 มีความผิดปกติหรือเกิดรอยหยักที่
ความถี่สามัญ (Ordinary : O) และความถี่สามัญพิเศษ (Extraordinary : X) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความถี่
วิกฤต $foF2$ (ต่างกัน 0.3 MHz) เมื่อเกิดรูปไอโอโนแกรมตามตัวอย่างนี้ ความถี่ที่อ่านได้ต้องนำค่าความถี่

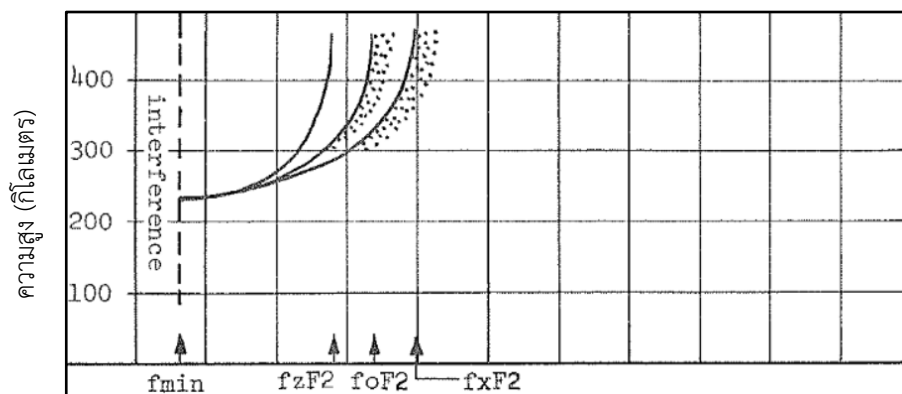
สามัญและความถี่สามัญพิเศษทำการหารด้วย 2 ($f_B/2$) โดยที่ f_{xF2} คือความถี่สามัญพิเศษและ f_B คือความถี่สามัญ ส่งผลให้รูปนี้สามารถอ่านค่าความถี่วิกฤต $f_oF2 = (f_{xF2}-f_B/2)UH = 9.1UH$ MHz



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.26 ค่าของความถี่วิกฤต f_oF2 มีค่าความสูงเกินขีดจำกัดของรูปไอโอโนแกรม

จะเห็นได้ว่าค่าความสูงของชั้น F2 มีค่าความสูงจากพื้นดินมากกว่าปกติ มีค่าสูงถึง 540 กิโลเมตร แต่ยังไม่เกินช่วงค่าความสูงสูงสุด (600 กิโลเมตร) แต่เนื่องจากขีดจำกัดความสูงของไอโอโนซอนด์อยู่ที่ประมาณ 800-1000 กิโลเมตร จึงไม่สามารถเห็นไอโอโนแกรมแบบนี้ได้จริง แต่ในกรณีนี้ยังคงมีค่าความถี่ที่มีความสูงเกินขีดจำกัดจึงใช้สัญลักษณ์ W แทนค่า และ U แทนค่าความสูงของชั้น F2 มีค่ามากกว่าปกติ ส่งผลให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ $f_oF2 = (f_oF2)UW = 5.6UW$ MHz



ความถี่ (เมกะเฮิร์ตซ์)

รูปที่ 3.27 ค่าของความถี่วิกฤต f_oF2 มีความถี่ Z-mode เกิดขึ้น

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมนี้จะมีค่าความถี่เกิดขึ้นพร้อมกัน 3 ความถี่ โดยจะมีความถี่แม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์ (Magneto electronic) หรือ Z-mode ซึ่งปกติจากเดิมจะพบแค่ 2 ความถี่คือ

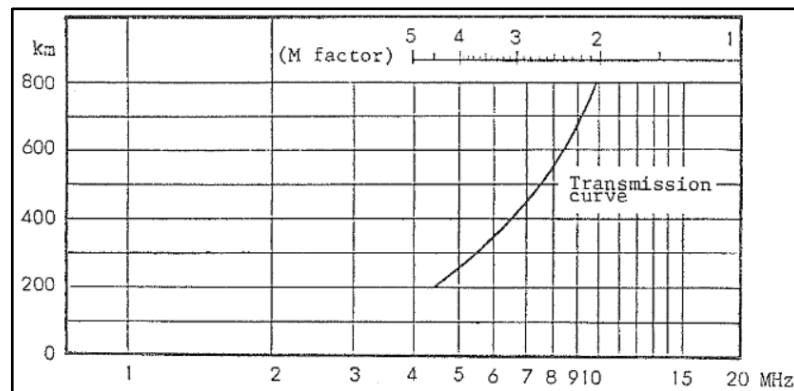
ความถี่สามัญ (Ordinary : O) และความถี่สามัญพิเศษ (Extraordinary : X) โดยแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์ตัวที่สามที่แพร่กระจายไปตามเส้นสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง $f_x F2$ และ $f_z F2$ เท่ากับ f_B (gyro frequency) แทนใช้สัญลักษณ์ Z แทนค่าการเกิดแม่เหล็กอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 หรือ $foF2 = (foF2)Z = 4.4Z$ MHz

3.3.2.2 การเก็บค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2

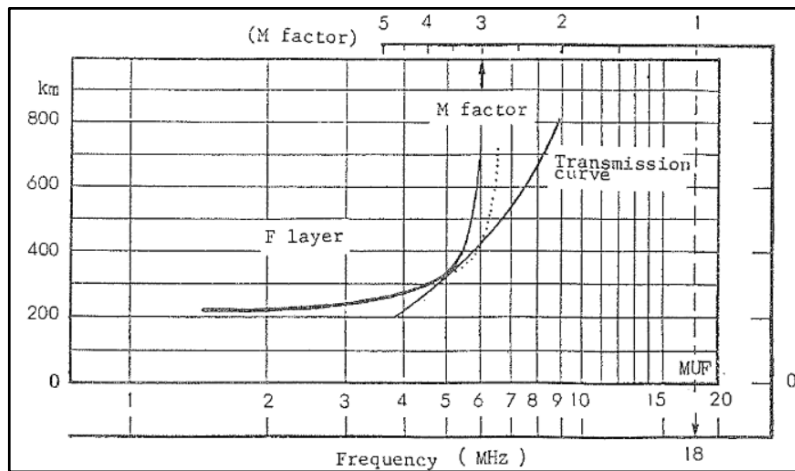
MUF(3000)F2 (Maximum Usable Frequency Factor) คือค่าความถี่สูงสุดที่ใช้งานได้ซึ่งระยะทาง 3000 กิโลเมตรของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้สัญลักษณ์คือ MUF(3000)F2 โดยที่ค่าพารามิเตอร์นี้จะมีความเกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ $foF2$ ซึ่งถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า M(3000)F2 จากสมการ

$$M(3000)F2 = MUF(3000)F2 / foF2 \quad (3.1)$$

โดยที่ค่า MUF(3000)F2 สามารถวัดได้จากเส้นสัมผัสที่ทาบบกับส่วนโค้งของค่าความถี่วิกฤต ($foF2$) ของชั้น F2 จากภาพไอโอโนแกรม แสดงดังรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29 ตามลำดับ

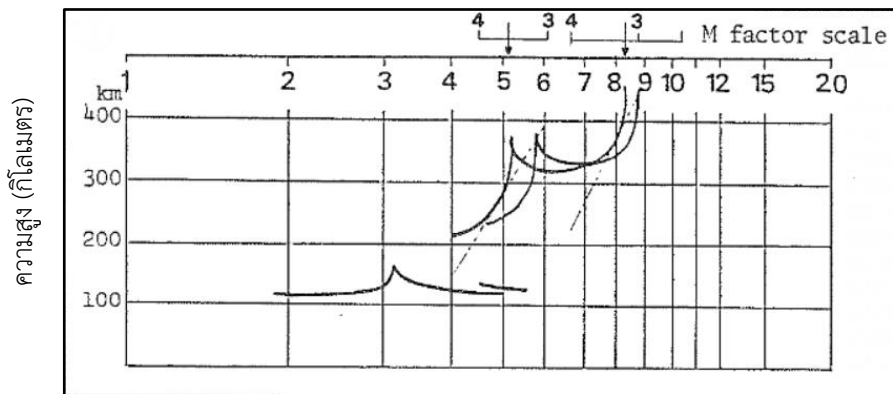


รูปที่ 3.28 ภาพจำลองของ MUF



รูปที่ 3.29 ภาพจำลองการใช้งานของ MUF

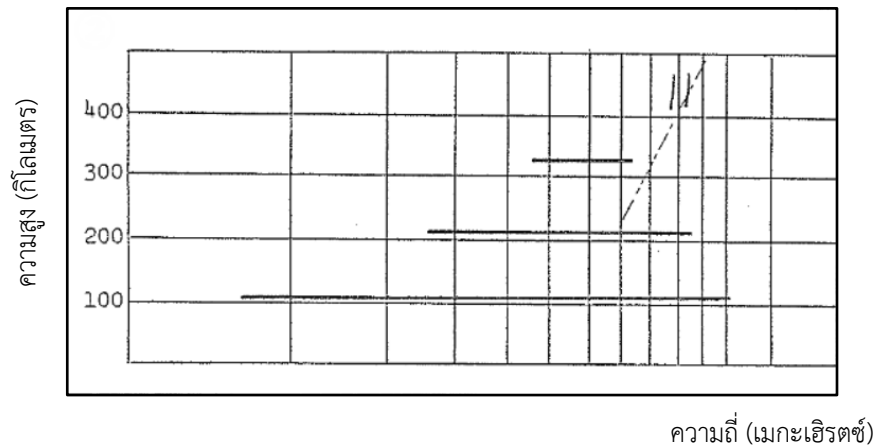
โดยมีตัวอย่างการอ่านค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จากภาพไอโอโนแกรม ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ดังนี้



ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

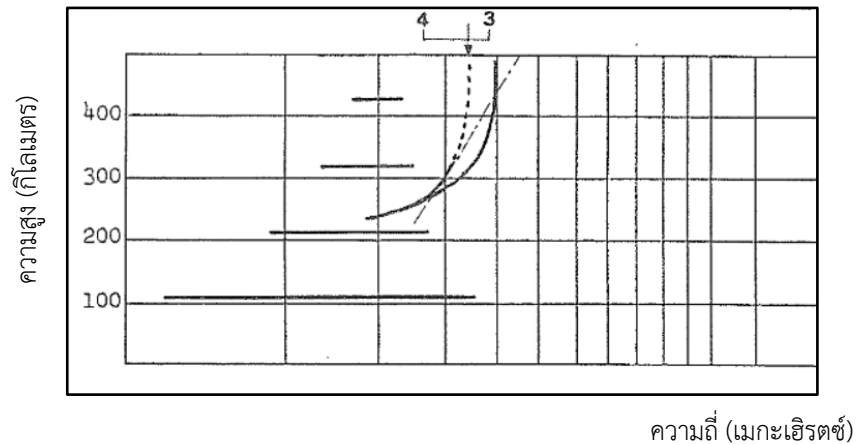
รูปที่ 3.30 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (1)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมรูปนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน ช่วงเดือนพฤษภาคมถึงกรกฎาคม ทำให้สามารถเก็บค่าข้อมูลของชั้น F1 และ F2 ได้อย่างชัดเจน โดยที่ค่า $f_oF1 = 5.2$ MHz และ $f_oF2 = 8.2$ MHz เมื่อนำสเกลไปทับกับกับส่วนโค้งของชั้น F1 และ F2 จะทำให้ได้ค่า $M(3000)F1 = 31.5$ MHz และ $M(3000)F2 = 35.5$ MHz ตามลำดับ



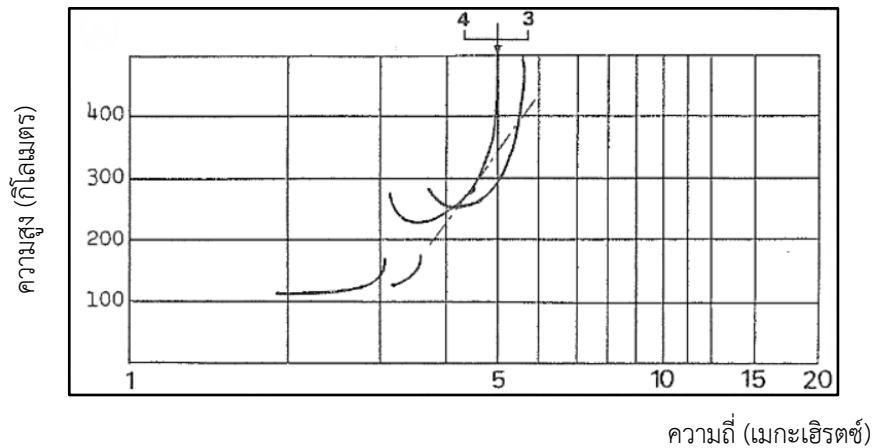
รูปที่ 3.31 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (2)

จะเห็นได้ว่าค่าความถี่ของชั้น F2 ของพารามิเตอร์ foF2 และ fxF2 ถูกบดบังด้วยชั้น Es ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าข้อมูลได้ จึงใช้สัญลักษณ์ A แทนการบดบัง ทำให้ค่า M(3000)F1 = A และ M(3000)F2 = A นั่นเอง



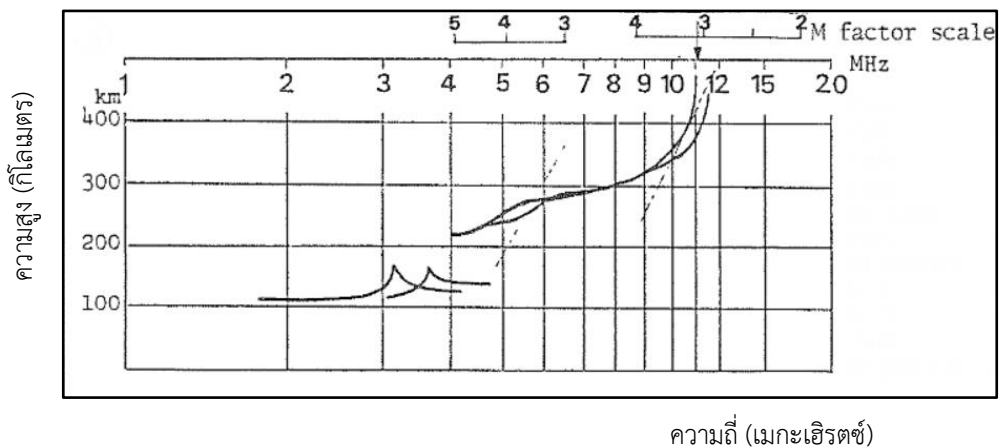
รูปที่ 3.32 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (3)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมแบบนี้จะเกิดในช่วงเวลากลางคืน โดยความถี่ชั้น F จะเห็นในช่วงที่เป็นความถี่สามัญพิเศษ (Extraordinary) ได้อย่างชัดเจน ส่วนความถี่สามัญ (Ordinary) จะขาดหายไป โดยจะหาค่าความถี่วิกฤต foF2 ได้จาก fxF2 ได้จากสมการ $foF2 = (fxF2 - fb/2)JR = 4.4JR$ MHz และส่งผลให้ค่า M(3000)F2 เมื่อนำสเกลไปเทียบกับกับส่วนโค้ง F2 จะได้ $M(3000)F2 = 33.0JR$ MHz



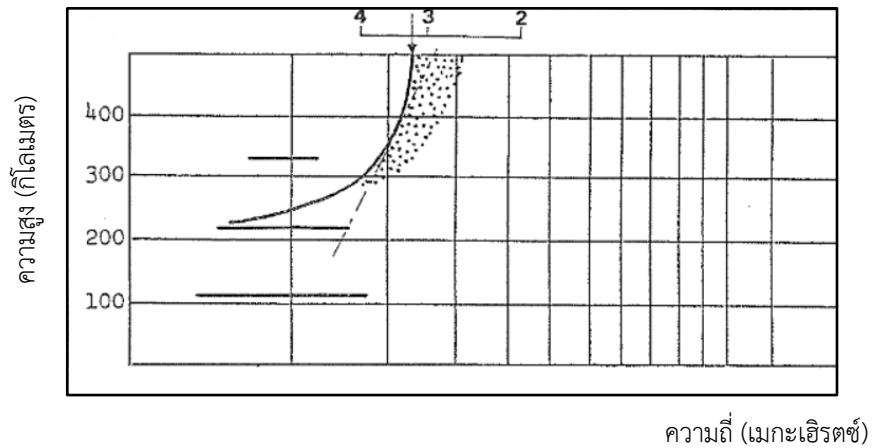
รูปที่ 3.33 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (4)

จะเห็นว่ารูปไอโอโนแกรมรูปนี้ไม่มีการแสดงค่าของชั้น F2 โดยในรูปเป็นการแสดงความถี่ของชั้น F1 ส่วนชั้น F2 จะถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ G ซึ่งค่าความถี่ foF2 มีค่าต่ำจนถึงค่าความถี่ foF1 หรืออาจจะต่ำกว่า ส่งผลให้ค่า $M(3000)F1 = 34.5 \text{ MHz}$ และ $M(3000)F2 = G$ ตามลำดับ



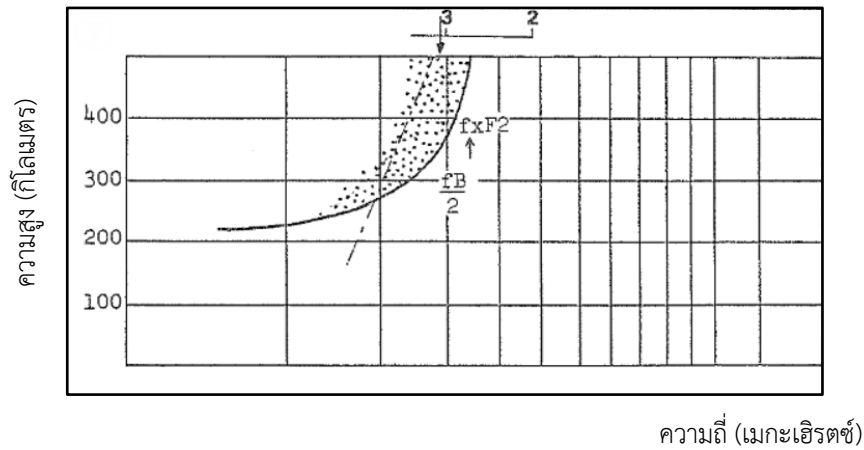
รูปที่ 3.34 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (5)

จะเห็นว่ารูปไอโอโนแกรมรูปนี้วัดค่าความถี่ foF2 ได้อย่างปกติแต่ค่าความถี่ foF1 แสดงค่าไม่ค่อยชัดเจน จะแทนค่าโดยใช้สัญลักษณ์ L ดังนั้นค่า $M(3000)F1 = L$ และ $M(3000)F2 = 31.0 \text{ MHz}$ ตามลำดับ



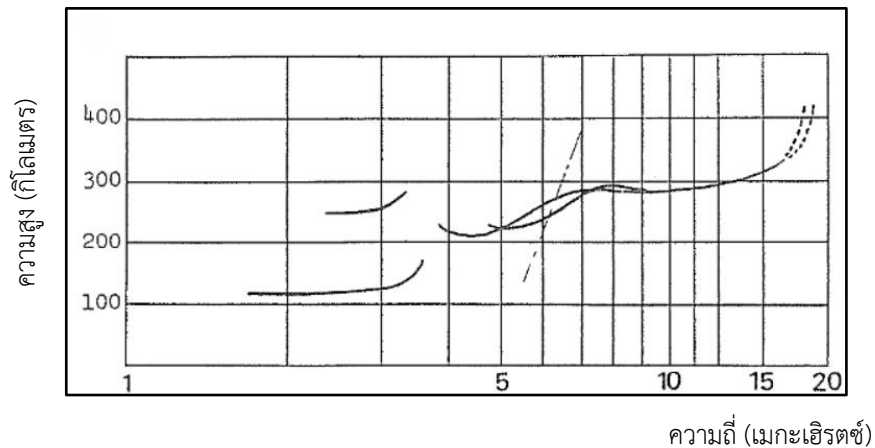
รูปที่ 3.35 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (6)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมจะเกิดในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเกิดปรากฏการณ์สเปรตเอฟเกิดขึ้น มีค่าความถี่วิกฤต $f_oF2 = 3.4F$ MHz เมื่อนำสเกลไปทับกับกับส่วนโค้ง F2 จะได้ $M(3000)F2 = 32.0F$ MHz



รูปที่ 3.36 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (7)

จะเห็นได้ว่ารูปไอโอโนแกรมรูปนี้จะคล้ายกับรูปที่ 3.35 แต่มีความถี่ที่ค่อนข้างกว้างและวัดวัดจากขอบที่อยู่รอบนอกแทน โดยค่าความถี่ f_oF2 จะอนุมานได้จากค่าความถี่สามัญพิเศษ (Extraordinary) โดยมีค่า $f_xF2 = 4.4$ MHz และเมื่อนำสเกลไปทับกับกับส่วนโค้ง F2 จะได้ $M(3000)F2 = 30.5JF$ MHz



รูปที่ 3.37 ภาพจำลองไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบ (8)

จะเห็นว่าไม่มีการบันทึกค่าความถี่ที่สูงกว่า 16.7 MHz เนื่องจากความกว้างของความถี่ไม่ครบเกิน 20% ของ foF2 (foF2 = 16.7DR MHz) โดยจะใช้สัญลักษณ์ D แทนค่าช่วงความกว้างของความถี่ ส่งผลให้ค่า M(3000)F2 = R และค่าความถี่ foF1 แสดงค่าไม่ค่อยชัดเจน จะแทนค่าโดยใช้สัญลักษณ์ L ดังนั้นค่า M(3000)F1 = L

3.3.2.3 การเก็บค่าพารามิเตอร์ NmF2

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยใช้สัญลักษณ์คือ NmF2 โดยที่ค่าพารามิเตอร์นี้มีความสำคัญมากสำหรับการออกแบบและการสร้างแบบจำลองในระบบสื่อสารในย่านความถี่สูง โดยสามารถคำนวณได้จากค่าความถี่วิกฤต (foF2) ของชั้น F2 ดังสมการ

$$NmF2 = (foF2)^2 / 80.5 \quad (3.2)$$

โดยที่การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าแตกต่างกันออกไป ซึ่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ NmF2 เป็นรายชั่วโมง โดยใช้โปรแกรม Special scaling ในการเก็บข้อมูล โดยการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ.2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2561 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาแบบรายวัน รายฤดูกาลและรายปี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 กับค่าที่เก็บได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะแสดงไว้ในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตร และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ และค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด ($NmF2$) ของชั้น F2 โดยทำการวิเคราะห์ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายฤดูกาล และรายปี โดยที่พารามิเตอร์ $M(3000)F2$ สามารถหาค่าได้จากค่าพารามิเตอร์ $foF2$ และ $MUF(3000)F2$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรม โดยคำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$M(3000)F2 = MUF(3000)F2 / foF2 \quad (4.1)$$

โดยที่ $MUF(3000)F2$ คือความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ของชั้น F2 ที่ระยะ 3,000 กิโลเมตร และ $foF2$ คือค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรม

ในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด ($NmF2$) ของชั้น F2 สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.2

$$NmF2 = (foF2)^2 / 80.5 \quad (4.2)$$

แล้วนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบน $\Delta M(3000)F2(\%)$ ระหว่างค่าที่สังเกตได้กับค่าแบบจำลอง IRI-2016 คำนวณได้จากสมการที่ 4.3

$$\Delta M(3000)F2(\%) = [(M(3000)F2_{IRI} - M(3000)F2_{Obs}) / M(3000)F2_{Obs}] \times 100\% \quad (4.3)$$

โดยที่ $M(3000)F2_{IRI}$ คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ของชั้น F2 ที่ระยะ 3,000 กิโลเมตรที่ได้จากแบบจำลอง ในขณะที่ค่า $M(3000)F2_{Obs}$ คือความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ของชั้น F2 ที่ระยะ 3,000 กิโลเมตรที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรม และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบน $\Delta NmF2(\%)$ ระหว่างค่าที่สังเกตได้กับค่าแบบจำลอง IRI-2016 คำนวณได้จาก

$$\Delta NmF2(\%) = [(NmF2_{IRI} - NmF2_{Obs}) / NmF2_{Obs}] \times 100\% \quad (4.4)$$

โดยที่ $NmF2_{IRI}$ คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ในขณะที่ค่า $NmF2_{Obs}$ คือค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดที่ได้จากสมการ 4.2

4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

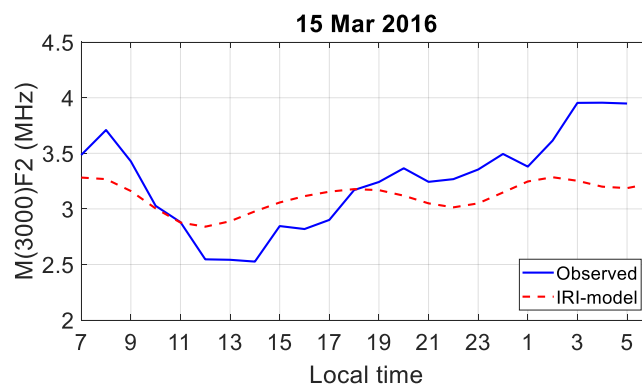
ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 และทำการศึกษาจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานี คือสถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย

4.1.1 สถานีเชียงใหม่

สถานีเชียงใหม่เป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา ชื่อของสถานีคือ CMU โดยเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 12.7 องศาเหนือ โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบรายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.1.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายวัน

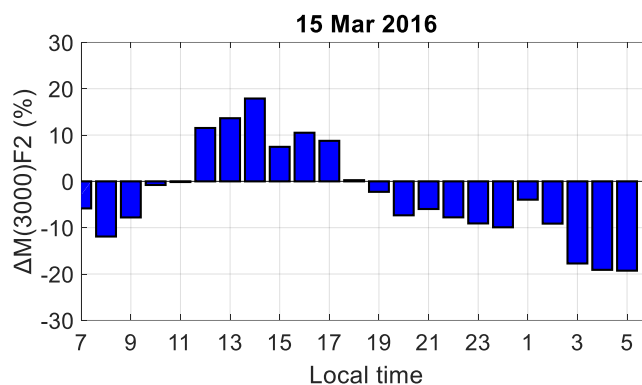
การศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายวัน ซึ่งได้กำหนดเลือกวันในช่วงฤดูของ Equinox ในปีที่มีข้อมูลสมบูรณ์ โดยกำหนดเลือกเป็นวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2559 เพื่อทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} โดยเส้นสีทึบน้ำเงิน คือผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูลและเส้นประสีแดง คือผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ทั้ง 2 แบบ มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน คือมีค่าลดลงในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงเวลาที่เที่ยงหรือช่วงเวลาประมาณ 03.00-12.00 น. และจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากช่วงเวลาที่บ่ายโมงจนถึงช่วงเวลาหลังเที่ยงคืน หรือช่วงเวลาประมาณ 13.00-03.00 น. แต่จะมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 20.00-00.00 น.

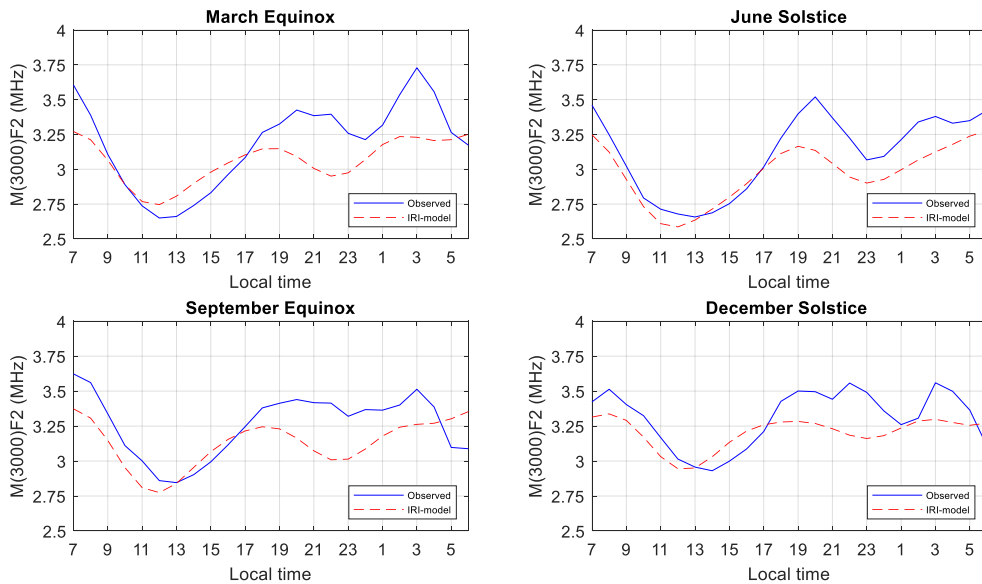
เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง พบว่าค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล $M(3000)F2_{Obs}$ ในช่วงเวลาเช้าจนถึงเวลาก่อนเที่ยง ซึ่งอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 07.00-11.00 น. และอีกช่วงคือช่วงเวลาที่หลังพระอาทิตย์ตกดินไปแล้ว เวลาประมาณ 18.00-06.00 น. โดยค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล $M(3000)F2_{Obs}$ มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 4 MHz ในขณะที่ค่าที่ได้จากแบบจำลอง $M(3000)F2_{IRI}$ มีค่าสูงสุดประมาณ 3.25 MHz แต่ในช่วงเวลากลางวันในช่วงเวลาประมาณ 11.00-18.00 น. พบว่าค่า $M(3000)F2_{IRI}$ มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล $M(3000)F2_{Obs}$ โดยค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล $M(3000)F2_{Obs}$ มีค่าประมาณ 2.5 MHz และค่าที่ได้จากแบบจำลอง $M(3000)F2_{IRI}$ มีค่าประมาณ 2.75 MHz และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบน $\Delta M(3000)F2(\%)$ ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.3 พบว่ามีค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -19% ถึง 17.5% ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

4.1.1.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ แบบรายฤดูกาล สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงตามการยึดตำแหน่งของอาทิตย์เป็นหลักออกเป็น 4 ฤดูกาลคือ March Equinox เดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน, June Solstice เดือนพฤษภาคมถึงเดือนสิงหาคม,

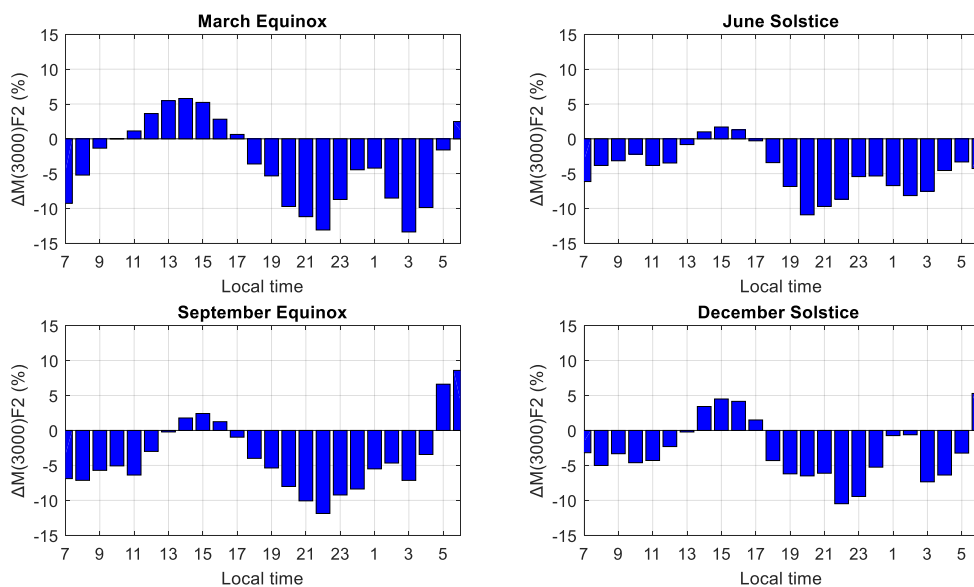
September Equinox เดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม และ December Solstice เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ โดยแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ แบบรายฤดูกาล โดยค่า $M(3000)F2_{Obs}$ ได้มาจากการเก็บข้อมูล โดยจากรูปพบว่าในแต่ละฤดูกาลนั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือค่าของ $M(3000)F2_{Obs}$ จะมีค่าสูงขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นหรือในช่วงเวลาประมาณ 06.00-07.00 น. และจะมีค่าลดลงในช่วงเวลาประมาณ 09.00-13.00 น. โดยในช่วงฤดู March Equinox มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 2.65 MHz, ช่วงฤดู June Solstice มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 2.63 MHz, ช่วงฤดู September Equinox มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 2.8 MHz และช่วงฤดู December Solstice มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 2.9 MHz จึงทำให้ช่วงฤดู June Solstice มีค่าต่ำที่สุด และจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งจนถึงช่วงพระอาทิตย์ตกดินเวลาประมาณ 18.00-19.00 น. โดยแต่ละฤดูกาลมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.4-3.5 MHz หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลา 03.00 น. โดยในช่วงฤดู March Equinox จะมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 3.75 MHz เมื่อเทียบกับค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 พบว่าช่วงเวลาที่ลดลงในช่วงเวลาประมาณ 09.00-13.00 น. ช่วงฤดู June Solstice จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับฤดูกาลอื่น ๆ มีค่าอยู่ที่ 2.55 MHz และค่าที่เพิ่มขึ้นสูงสุดก่อนช่วงพระอาทิตย์ตกดินอยู่ในช่วงฤดู December Solstice มีค่าประมาณ 3.3 MHz เมื่อนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบน $\Delta M(3000)F2(\%)$ จะเห็นว่าค่าของ $M(3000)F2_{Obs}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จาก

แบบจำลอง ยกเว้นในช่วงเวลา 13.00-17.00น. จะมีค่าน้อยกว่าค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้แบบจำลอง โดยเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงในช่วงฤดู March Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 6% และ -14% ช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 2% และ -11% ช่วงฤดู September Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 9% และ -12% และช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 5.5% และ -10.5% ตามลำดับ จึงทำให้ในช่วงฤดู June Solstice ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 มากกว่าฤดูกาลอื่น ๆ โดยแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งมีความถี่ประมาณ 2.932 MHz โดยเป็นปีที่มีความถี่วิกฤต ($foF2$) สูงสุดในชั้นบรรยากาศมากที่สุด จึงส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ที่ได้จะมีค่าแปรผันกับค่าความถี่วิกฤต และมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2559 มีความถี่ประมาณ 3.412 MHz ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ มีค่าต่ำที่สุดในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2557 เช่นกันเดียวกันกับ $M(3000)F2_{Obs}$ ซึ่งมีความถี่ประมาณ 2.836 MHz และมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2561 มีความถี่ประมาณ 3.332 MHz

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

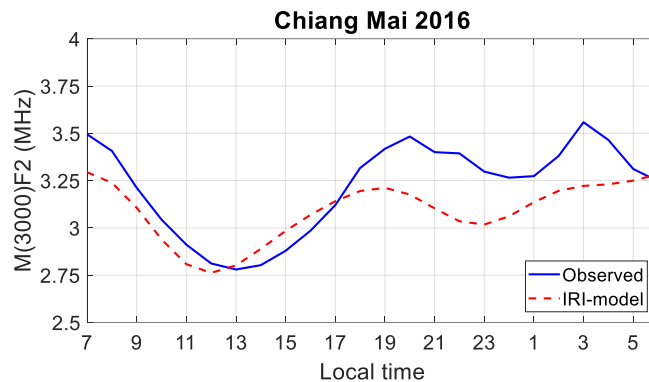
ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีเชียงใหม่								
ปี พ.ศ.	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	3.180	3.180	3.151	3.026	N/A	3.165	3.339	3.229
2554	3.176	3.059	3.099	2.909	3.192	3.002	3.249	3.087
2555	3.144	2.952	3.042	2.898	3.167	3.011	3.322	3.113
2556	3.233	2.988	3.135	2.886	3.181	2.954	3.199	3.042
2557	2.933	2.893	2.932	2.836	2.979	2.974	3.155	3.098
2558	3.087	2.998	3.038	2.922	3.212	3.071	3.322	3.204
2559	3.253	3.114	3.155	2.989	3.266	3.163	3.412	3.275
2560	3.243	3.163	3.206	3.029	3.303	3.209	3.388	3.309
2561	3.214	3.196	3.144	3.067	3.229	3.241	3.324	3.332

4.1.1.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี

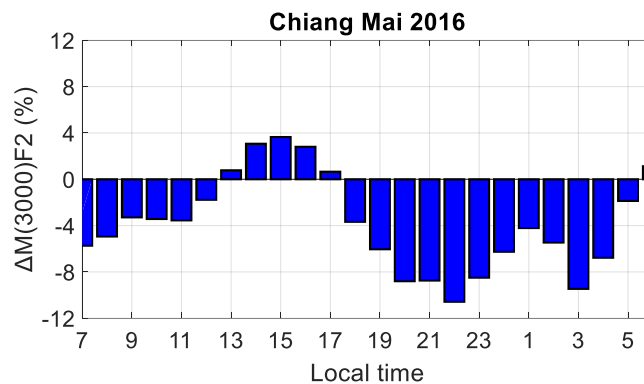
จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี ซึ่งได้ทำการเลือกปีที่มีความสมบูรณ์ของข้อมูลคือปี พ.ศ. 2559 จากสถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย มาทำการศึกษาแสดงผลการเปลี่ยนแปลงการเปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} เทียบกับ M(3000)F2_{IRI} ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5

พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นหรือในช่วงเวลาประมาณ 06.00-07.00 น. และจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดต่ำสุดช่วงเวลาประมาณ 13.00 น. โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 2.8 MHz และจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งจนถึงช่วงพระอาทิตย์ตกดินเวลาประมาณ 20.00 น. มีค่าสูงสุดประมาณ 3.49 MHz หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ อีกครั้งจนถึงจุดต่ำสุดอีกครั้งเวลาประมาณ 01.00 น. มีค่าประมาณ 3.26 MHz ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 03.00 น. มีค่าประมาณ 3.52 MHz เมื่อเทียบกับค่า M(3000)F2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นหรือในช่วงเวลาประมาณ 06.00-07.00 น. และจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดต่ำสุดช่วงเวลาประมาณ 12.00 น. มีค่าต่ำสุดประมาณ 2.75 MHz และจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งจนถึงช่วงพระอาทิตย์ตกดินเวลาประมาณ 19.00 น. มีค่าสูงสุดประมาณ 3.24 MHz หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ อีกครั้งจนถึงจุด

ต่ำสุดเวลาประมาณ 23.00 น. มีค่าประมาณ 3.02 MHz ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงช่วงเวลาประมาณ 05.00-06.00 น.



รูปที่ 4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี



รูปที่ 4.6 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ยกเว้นในช่วงเวลา 13.00-17.00 น. จะมีค่าน้อยกว่าแบบจำลอง โดยมีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 4% และ -10.5% ตามลำดับ

ผลการแสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ในช่วงเวลากลางวันประมาณ 07.00-17.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 2.728 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2560 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินเวลาประมาณ 18.00-19.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 3.518 MHz ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์

M(3000)F2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ช่วงเวลากลางวันเช่นกันเดียวกับ M(3000)F2_{Obs} ซึ่งมีค่าประมาณ 2.848 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. มีค่าประมาณ 3.331 MHz

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีเชียงใหม่								
ปี พ.ศ.	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)		เวลากลางวัน (07.00-17.00)		เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)		เวลากลางคืน (20.00-04.00)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	3.376	3.295	2.996	3.049	3.268	3.233	3.369	3.182
2554	3.249	3.200	2.912	2.912	3.210	3.059	3.369	3.085
2555	3.149	3.163	2.941	2.884	3.172	3.018	3.310	3.048
2556	3.187	3.158	3.017	2.861	3.241	2.994	3.345	3.043
2557	3.116	3.126	2.728	2.848	2.906	2.968	3.195	3.001
2558	3.180	3.193	2.817	2.924	3.155	3.085	3.289	3.073
2559	3.261	3.260	2.979	3.012	3.340	3.206	3.376	3.142
2560	3.246	3.302	3.205	3.059	3.518	3.274	3.365	3.189
2561	3.370	3.331	3.103	3.098	3.422	3.322	3.295	3.231

4.1.1.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot

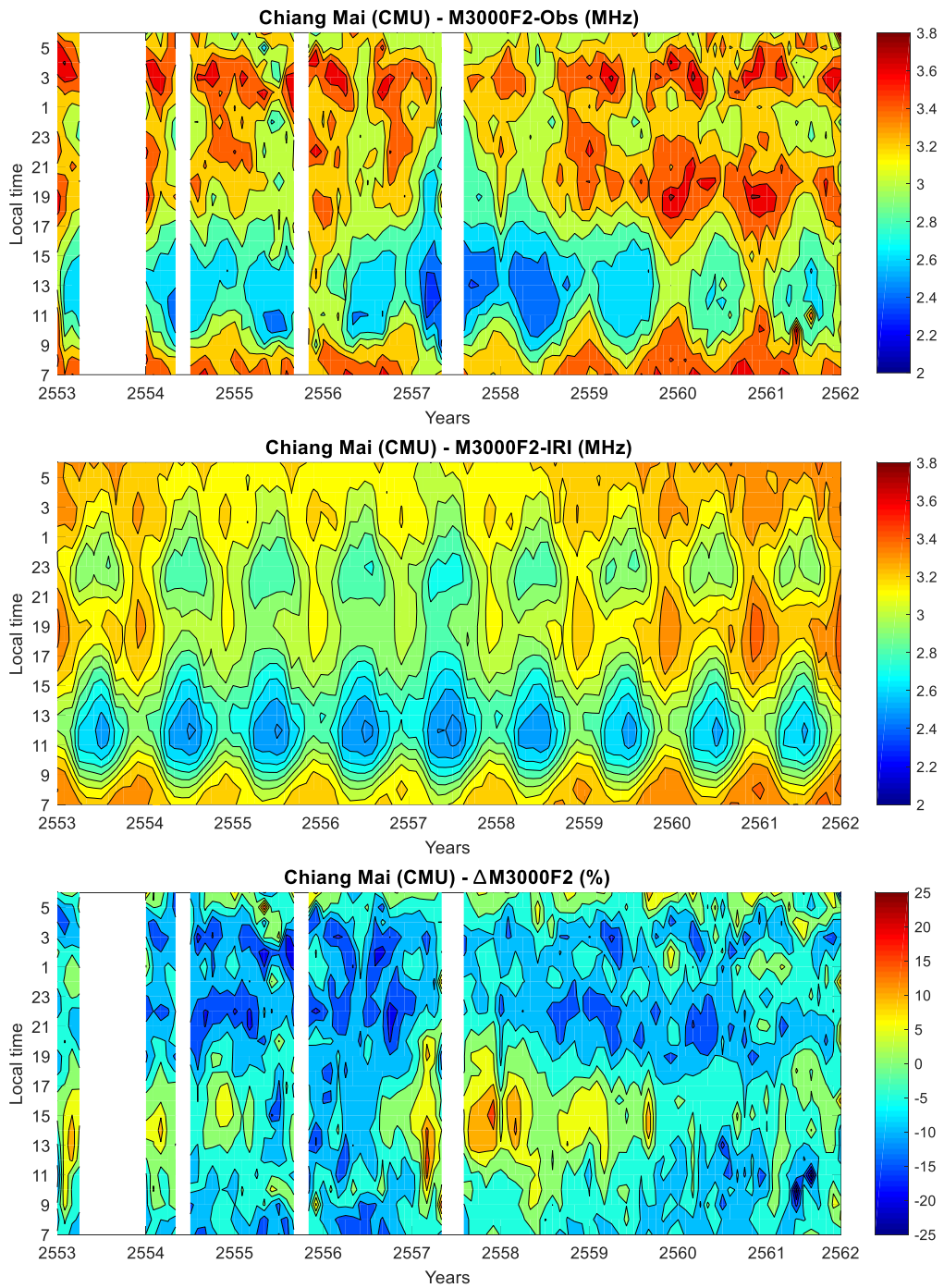
ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของชั้น F2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมกับแบบจำลอง IRI-2016 ของสถานีเชียงใหม่ โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.7

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4.1 พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} จะมีค่าต่ำอยู่ในช่วงเวลากลางวันหรือพระอาทิตย์ขึ้น ช่วงเวลาประมาณ 08.00-18.00 น. มีค่าประมาณ 2.2 MHz ถึง 3.0 MHz และมีค่าต่ำที่สุดประมาณกลางเดือนเมษายน พ.ศ. 2557 มีค่าประมาณ 2.288 MHz ในช่วงเวลา 11.00-13.00 น. ซึ่งเป็นปีที่มีค่าความถี่วิกฤต (foF2) ในชั้นบรรยากาศมากที่สุดจากการแปรผัน

ตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ โดยการยึดตำแหน่งของดวงอาทิตย์เป็นหลัก จึงส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ มีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ที่ได้จะมีค่าแปรผกผันกับค่าความถี่วิกฤต และหลังจากนั้นค่า $M(3000)F2_{Obs}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงหลังพระอาทิตย์ตกดินไปแล้ว เนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนค่าความถี่วิกฤตจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 02.00-05.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 3.0 MHz ถึง 3.8 MHz และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.875 MHz ในช่วงประมาณเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 โดยที่การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกปี แต่จะมีข้อมูลที่ไม่สามารถเก็บค่าได้ส่วนใหญ่อยู่ในปี พ.ศ. 2553 และมีข้อมูลบางช่วงไม่สามารถเก็บค่าได้ในปี พ.ศ. 2554, พ.ศ. 2555, พ.ศ. 2557 และ พ.ศ. 2561 ตามลำดับ

เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) พบว่าในแต่ละปีค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ จะมีค่าต่ำในช่วงกลางวันเวลาประมาณ 07.00-18.00 น. มีค่าประมาณ 2.5 MHz ถึง 3.0 MHz และในช่วงกลางคืนเวลาประมาณ 21.00-03.00 น. มีค่าประมาณ 2.8 MHz ถึง 3.4 MHz โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2557 มีค่าประมาณ 2.50 MHz ในช่วงเวลา 11.00-13.00 น. ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มากที่สุด (High solar activity) เมื่อเทียบกับปีอื่น ๆ ส่งผลทำให้ค่าความถี่วิกฤต (f_oF2) มีค่ามากเช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ (รูปบน) และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.43 MHz ถึง 3.47 MHz ในช่วงปี พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2554 และอีกช่วงในปี พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2561 เนื่องจากเป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์น้อย (Low solar activity) และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.471 MHz ในปี พ.ศ. 2561 เพราะเป็นปีที่มีค่า f_oF2 ต่ำที่สุด จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ มีค่ามากที่สุด

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ และค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง -2% ถึง -8% และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปีทั้งหมดอยู่ระหว่าง -28 ถึง 19% โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนต่ำที่สุดประมาณ -27.26% อยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนสูงที่สุดประมาณ 18.29% อยู่ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557



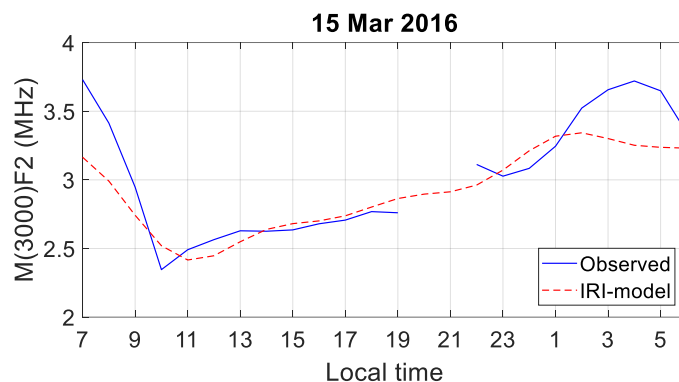
รูปที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

4.1.2 สถานีชุมพร

สถานีชุมพรเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่อยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ชื่อย่อสถานีคือ CPN โดยเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่ตั้งอยู่ที่สถานีสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบรายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.2.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ แบบรายวัน

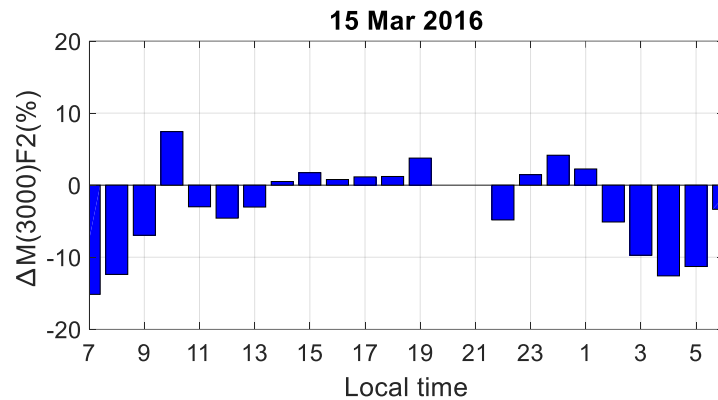
ได้กำหนดเลือกวันเช่นเดียวกับที่สถานีเชียงใหม่ โดยกำหนดเลือกเป็นวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ. 2559 เพื่อทำการศึกษาผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{Obs}}$ กับ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ ดังรูปที่ 4.8 พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ ทั้ง 2 แบบ มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึง คือค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{Obs}}$ มีค่าลดลงในช่วงเวลาประมาณ 05.00-10.00 น. มีค่าต่ำที่สุดประมาณ 2.34 MHz และจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 04.00 น. มีค่าประมาณ 3.72 MHz แต่ก็มีข้อมูลบางช่วงที่ไม่สามารถเก็บค่าได้ในช่วงเวลา 20.00-21.00 น. ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ มีค่าลดลงในช่วงเวลาประมาณ 03.00-11.00 น. มีค่าต่ำที่สุดอยู่ประมาณ 2.41 MHz และมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 12.00-02.00 น. โดยที่มีค่าที่สูงที่สุดประมาณ 3.34 MHz



รูปที่ 4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F_{2_{Obs}}$ กับ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่า $M(3000)F_2$ ระหว่างค่า $M(3000)F_{2_{Obs}}$ ได้จากการเก็บข้อมูลกับค่า $M(3000)F_{2_{IRI}}$ ได้จากแบบจำลอง พบว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล $M(3000)F_{2_{Obs}}$ ในเวลา 10.00 น. และอีกช่วงในช่วงเวลาประมาณ 13.00-01.00 น. แต่มีในช่วงเวลา 22.00 น. ที่มีค่าน้อยกว่าค่า $M(3000)F_{2_{Obs}}$ โดยมี

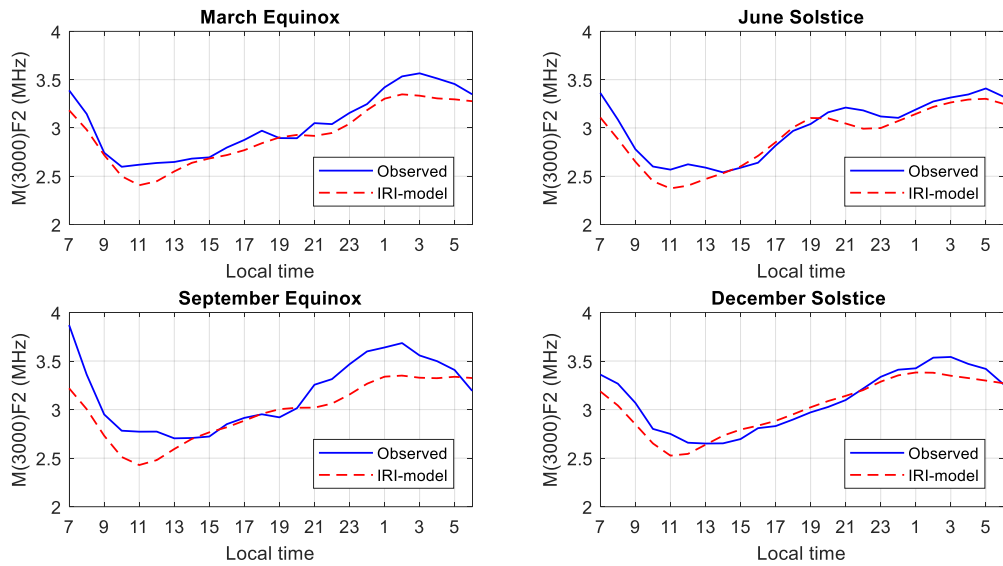
ค่าความแตกต่างสูงประมาณ 8% แต่ในช่วงเวลา 02.00-09.00 น. ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล $M(3000)F2_{Obs}$ แตกต่างกันประมาณ -15% ดังรูปที่ 4.9



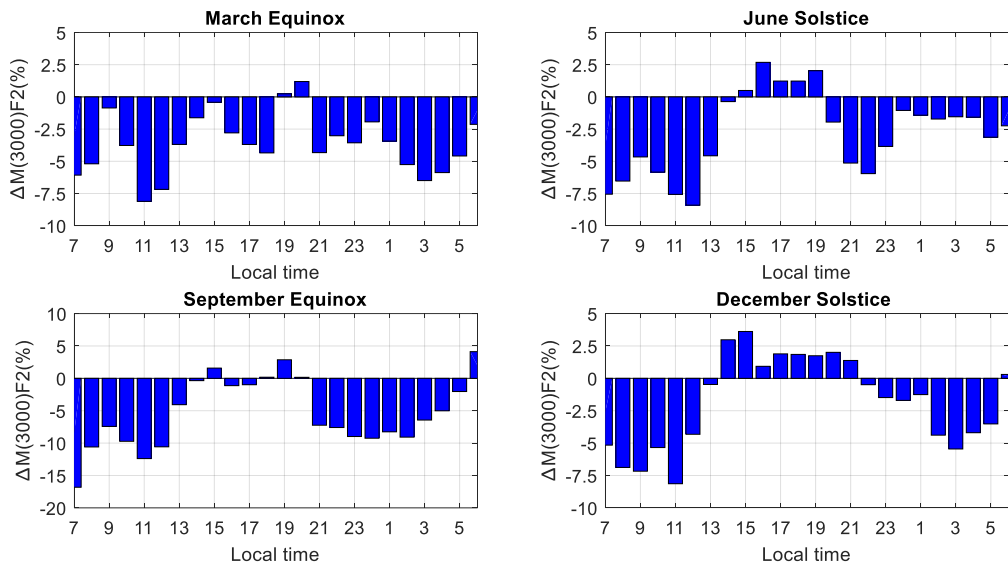
รูปที่ 4.9 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

4.1.2.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ แบบรายฤดูกาล สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงตามการยึดตำแหน่งของอาทิตย์เป็นหลักออกเป็น 4 ฤดูกาลคือ March Equinox, June Solstice, September Equinox และ December Solstice เช่นเดียวกับที่สถานีเชียงใหม่ โดยแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ แบบรายฤดูกาล และ เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่างค่า $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบฤดูกาล ดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ของแต่ละฤดูกาล จากรูปที่ 4.10 จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน คือจะมีค่าลดลงในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงช่วงเวลาประมาณเที่ยงวันเวลาประมาณ 04.00-12.00 น. หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 01.00-03.00 น. เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ มีค่าแปรผกผันจากค่าความถี่วิกฤตหรือ $foF2$ จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เมื่อได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ส่งผลทำให้ค่าความถี่วิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดช่วงช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ จะมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าประมาณ 3.87 MHz และมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดู June Solstice มีค่าประมาณ 2.54 MHz ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ ค่าสูงสุดอยู่ในช่วงฤดู December Solstice มีค่าประมาณ 3.38 MHz และค่าต่ำสุดอยู่ในช่วง June Solstice เช่นเดียวกับ $M(3000)F2_{Obs}$ มีค่าประมาณ 2.37 MHz โดยผลการเปรียบเทียบส่วนใหญ่ทั้ง 4 ฤดูกาล ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ จากค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง



รูปที่ 4.10 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล



รูปที่ 4.11 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

โดยเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่า $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ในช่วงฤดู March Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 1.19% และ -8.1% ช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 2.68% และ -8.4% ช่วงฤดู September Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 4.12% และ -16.82% และช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 3.61% และ

-8.13% ตามลำดับ จึงส่งผลทำให้ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลแตกต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 มากที่สุดเมื่อเทียบกับฤดูกาลอื่น ๆ ดังรูปที่ 4.11

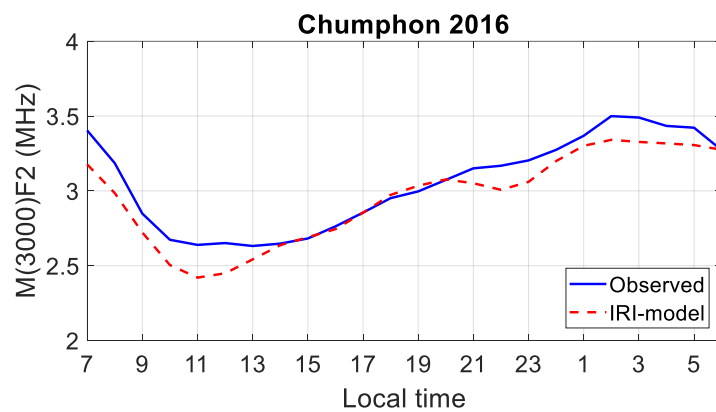
ผลแสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งมีค่าประมาณ 2.766 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2561 ซึ่งมีค่าประมาณ 3.277 MHz และมีบางช่วงฤดูที่ไม่สามารถเก็บค่าได้ซึ่งแสดงเป็นค่า N/A เนื่องจากไม่มีข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ที่สถานีชุมพร ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งมีค่าประมาณ 2.684 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าประมาณ 3.191 MHz

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

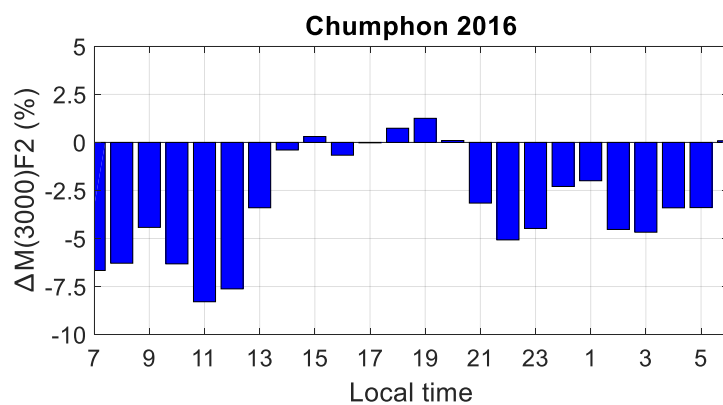
ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร								
ปี พ.ศ.	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	3.020	3.025	2.989	3.056	3.004	3.023	3.053	3.042
2554	N/A	2.887	N/A	2.911	N/A	2.822	3.199	2.870
2555	3.086	2.757	3.010	2.884	3.013	2.832	3.029	2.900
2556	2.770	2.792	2.776	2.854	2.876	2.751	2.911	2.821
2557	2.766	2.684	2.822	2.774	2.840	2.763	2.953	2.890
2558	2.871	2.807	3.107	2.918	3.106	2.891	3.092	3.025
2559	3.036	2.929	3.126	3.005	3.197	3.018	3.090	3.131
2560	N/A	3.006	N/A	3.069	N/A	3.059	N/A	3.165
2561	3.277	3.057	3.272	3.103	N/A	3.089	N/A	3.191

4.1.2.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี

ได้ทำการเลือกปี พ.ศ. 2559 จากข้อมูลที่มีทั้งหมดที่สถานีชุมพร ประเทศไทย แสดงดังรูปที่ 4.12 มาทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} เทียบกับ M(3000)F2_{IRI} แบบรายปี พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ทั้ง 2 แบบมีค่าลดลงในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นจนลดต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน หรือในช่วงเวลาประมาณ 05.00-12.00 น. หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดที่เวลาประมาณ 02.00-03.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 3.5 MHz และ 2.63 MHz และค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 3.34 MHz และ 2.42 MHz ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

จากรูปที่ 4.13 โดยที่ผลเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี พบว่าส่วนใหญ่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} มีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} ยกเว้นในช่วงเวลาประมาณ 15.00-20.00 น. โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง -8.29% ถึง 1.25%

ผลการแสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ในช่วงเวลากลางวันประมาณ 07.00-17.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 2.540 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลากลางคืนเวลาประมาณ 20.00-04.00 น. มีค่าประมาณ 3.470 MHz และมีบางปีที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้เนื่องจากไม่มีข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์คือปี พ.ศ. 2554 และปี พ.ศ. 2560 ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ช่วงเวลากลางวันเช่นกันเดียวกันกับ M(3000)F2_{Obs} ซึ่งมีค่าประมาณ 2.511 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. มีค่าประมาณ 3.356 MHz เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ที่สถานีเชียงใหม่ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ปี พ.ศ.	ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีชุมพร							
	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)		เวลากลางวัน (07.00-17.00)		เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)		เวลากลางคืน (20.00-04.00)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	3.404	3.336	2.733	2.717	2.934	3.014	3.331	3.232
2554	N/A	3.254	N/A	2.602	N/A	2.815	N/A	3.106
2555	3.323	3.223	2.629	2.559	2.890	2.771	3.414	3.055
2556	3.333	3.208	2.559	2.541	2.694	2.744	3.191	3.026
2557	3.318	3.188	2.540	2.511	2.719	2.689	3.256	3.009
2558	3.377	3.239	2.723	2.607	2.975	2.859	3.319	3.128
2559	3.363	3.298	2.758	2.685	2.990	3.003	3.284	3.207
2560	N/A	3.336	N/A	2.731	N/A	3.078	N/A	3.262
2561	3.444	3.356	2.859	2.766	3.308	3.136	3.470	3.301

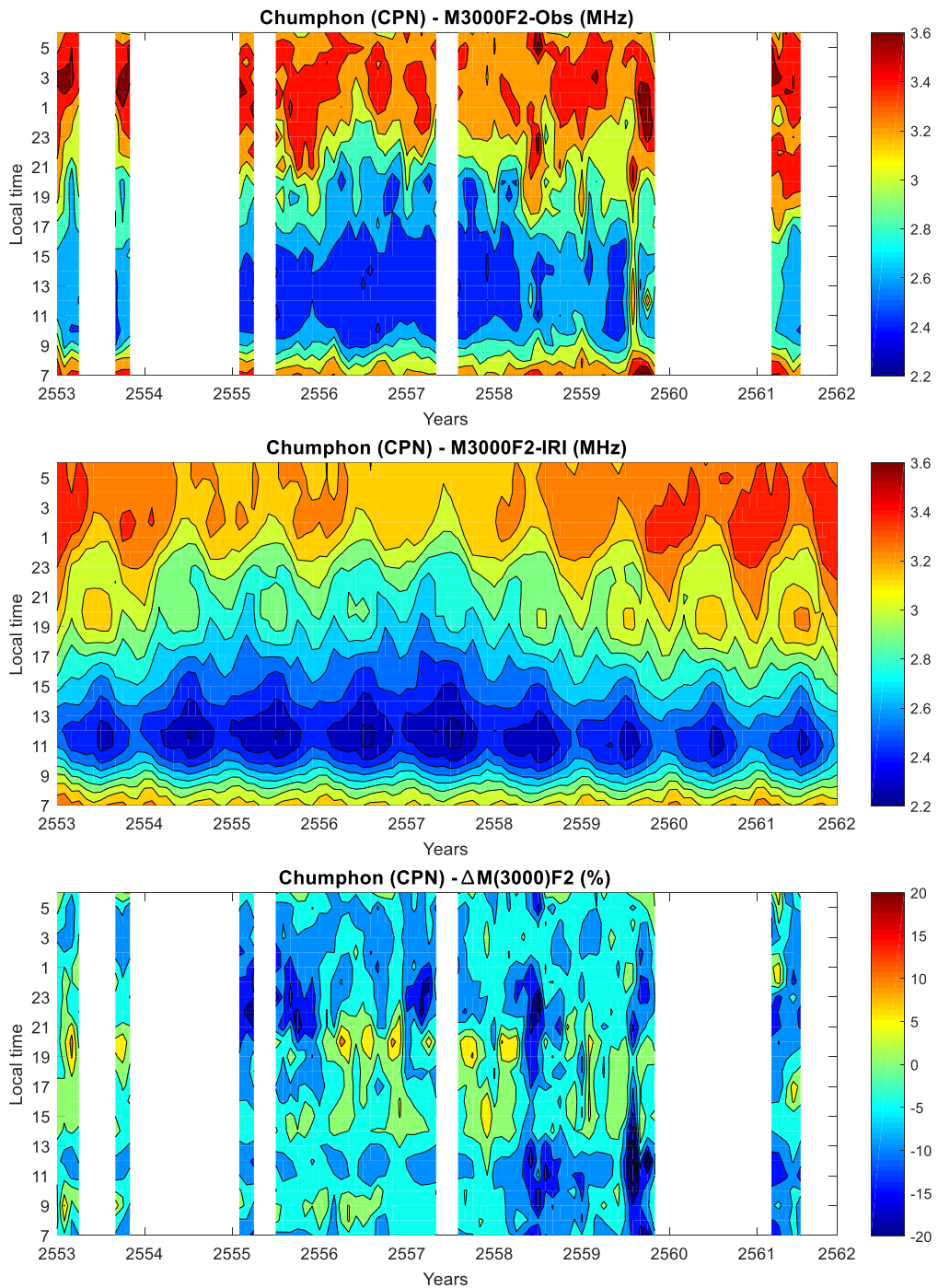
4.1.2.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ ของชั้น F_2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมกับแบบจำลอง IRI-2016 ของสถานีชุมพร โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.14

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ของสถานีชุมพร พบว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2Obs}$ จะมีค่าต่ำอยู่ในช่วงเวลากลางวันหรือช่วงเวลาประมาณ 09.00-17.00 น. มีค่าประมาณ 2.2 MHz ถึง 2.4 MHz และมีค่าต่ำที่สุดในเดือนสิงหาคมในปี พ.ศ. 2557 มีค่าประมาณ 2.363 MHz ในช่วงเวลา 12.00-14.00 น. และหลังจากนั้นค่า $M(3000)F_{2Obs}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงหลังพระอาทิตย์ตกดินไปแล้ว ซึ่งมีค่าประมาณ 3.0 MHz ถึง 3.6 MHz และมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 มีค่าประมาณ 3.788 MHz โดยที่การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2Obs}$ จะมีลักษณะคล้ายคลึงกันในทุกปี มีข้อมูลที่ไม่สามารถเก็บค่าได้ส่วนใหญ่ในปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2560 และมีข้อมูลบางช่วงไม่สามารถเก็บค่าได้ในปี พ.ศ. 2553, พ.ศ. 2555, พ.ศ. 2557 และ พ.ศ. 2561 ตามลำดับ

และเมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) พบว่าในแต่ละปีค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2IRI}$ จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ จะมีค่าต่ำในช่วงเวลากลางวันเวลาประมาณ 10.00-15.00 น. มีค่าประมาณ 2.2 MHz ถึง 2.5 MHz โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2557 มีค่าประมาณ 2.237 MHz ในช่วงเวลา 11.00-13.00 น. และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.3 MHz ถึง 3.5 MHz ในช่วงปี พ.ศ. 2561 มีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.457 MHz ในช่วงเวลา 02.00-05.00 น.

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2Obs}$ และค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2IRI}$ มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง -3% ถึง -10% และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปีทั้งหมดอยู่ระหว่าง -30 ถึง 13% โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนต่ำที่สุดประมาณ -30.31% อยู่ในวงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2559 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนสูงที่สุดประมาณ 12.90% อยู่ในวงเดือนเมษายน พ.ศ. 2556 ตามลำดับ



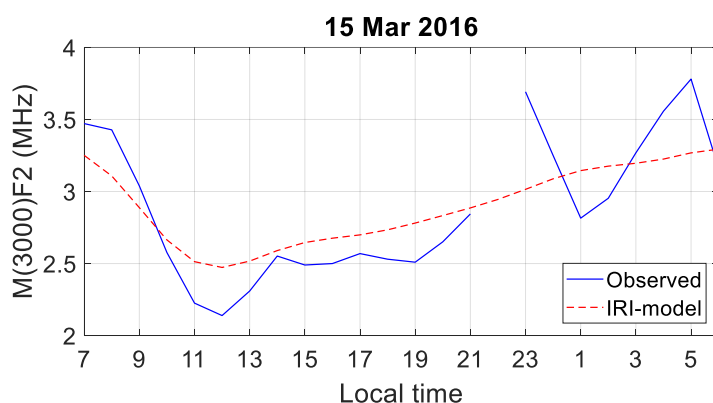
รูปที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

4.1.3 สถานีโกโตต้าง

สถานีโกโตต้างเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่อยู่บริเวณใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา ชื่อย่อสถานีคือ KTB โดยเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่ตั้งอยู่ที่สถานีสถาบันการบินและอวกาศแห่งชาติ (LAPAN) โกโตต้าง ประเทศอินโดนีเซีย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก -10.1 องศาเหนือ โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบรายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1.3.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ แบบรายวัน

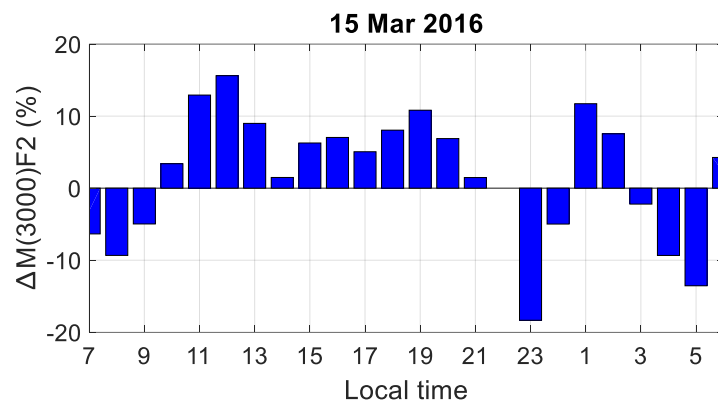
ได้กำหนดเลือกวันเช่นเดียวกับที่สถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพร โดยกำหนดเลือกเป็นวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559 เพื่อทำการศึกษาผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{Obs}}$ กับ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F_{2_{Obs}}$ กับ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ แบบรายวัน ของสถานีโกโตต้าง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

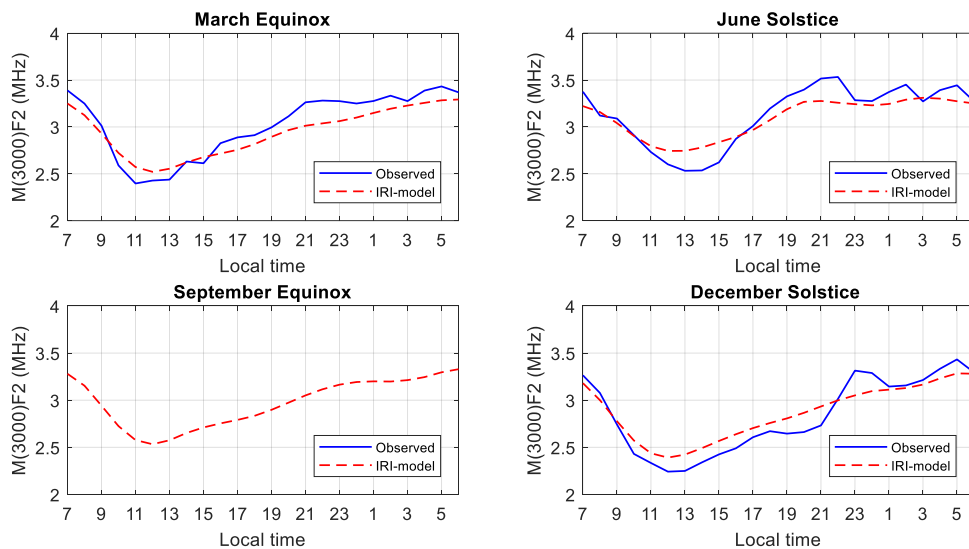
จากรูปที่ 4.15 พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ ทั้ง 2 แบบ มีลักษณะค่อนข้างต่างกันเล็กน้อย โดยที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{Obs}}$ จะมีค่าลดลงในช่วงเวลาประมาณ 07.00-12.00 น. จนมีค่าต่ำที่สุดอยู่ประมาณ 2.14 MHz จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 23.00 น. และมีค่าลดลงอีกครั้งในช่วงเวลา 01.00 น. ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลา 02.00-05.00 น. โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.78 MHz ซึ่งอาจจะเกิดจากปรากฏการณ์ผิดปกติในชั้น F2 ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ จะมีค่าลดลงในช่วงเวลาประมาณ 07.00-12.00 น. เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{Obs}}$ แต่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ประมาณ 2.47 MHz หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงช่วงเวลา 06.00 น. โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 3.29 MHz เมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ 2 แบบมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_{2_{IRI}}$ ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า

ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ อยู่ระหว่าง -18.33% ถึง 15.61% ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ แบบรายวัน ของสถานีโกโตต้าง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

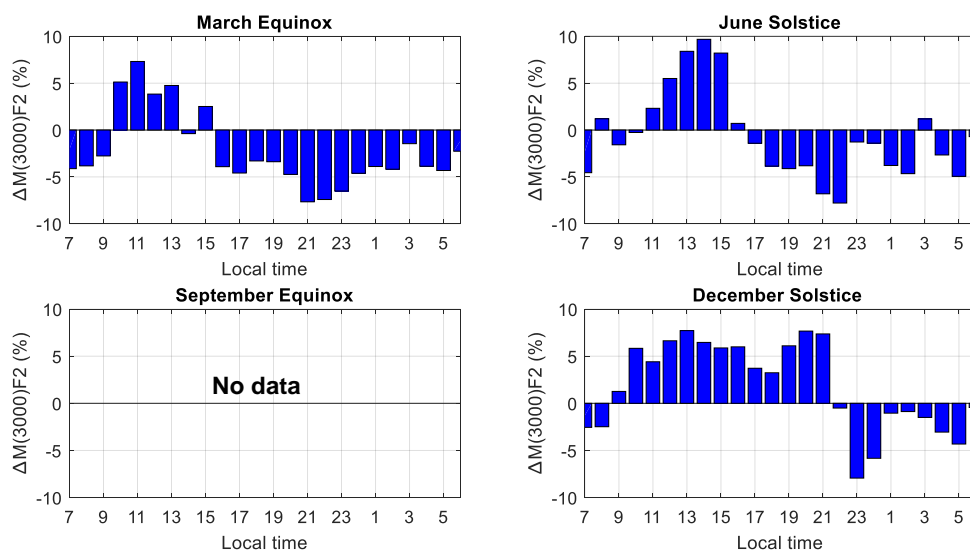
4.1.3.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ แบบรายฤดูกาล สามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงตามการยึดตำแหน่งของอาทิตย์เป็นหลักออกเป็น 4 ฤดูกาล เช่นเดียวกับที่สถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพร ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า $M(3000)F2$ ทั้ง 2 แบบมีลักษณะคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน คือมีค่าลดลงจากช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงเวลาเที่ยงวัน หรือช่วงเวลา 06.00-12.00 น. หลังจากนั้นค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงก่อนช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นของเช้าวันใหม่ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ในช่วงฤดู March Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.43 MHz และ 2.4 MHz ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.53 MHz และ 2.53 MHz ในช่วงฤดู September Equinox ไม่มีข้อมูลที่สามารถเก็บค่าได้ และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.43 MHz และ 2.24 MHz ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ ในช่วงฤดู March Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.29 MHz และ 2.52 MHz ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.31 MHz และ 2.74 MHz ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.32 MHz และ 2.53 MHz และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ 3.28 MHz และ 2.39 MHz ตามลำดับ

เมื่อนำผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ทั้ง $M(3000)F2_{Obs}$ และ $M(3000)F2_{IRI}$ มาเปรียบเทียบกัน พบว่าในช่วงเวลากลางวันค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{IRI}$ จะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ส่วนในช่วงเวลากลางคืนจะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ในช่วงฤดู March Equinox มีค่าอยู่ระหว่าง -7.66% ถึง 7.32% ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าอยู่ระหว่าง -7.79% ถึง 9.68% และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าอยู่ระหว่าง -7.93% ถึง 7.71% ส่วนในช่วงฤดู September Equinox ไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เนื่องจากไม่มีข้อมูลที่สามารถเก็บค่าได้ในช่วงฤดูนั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ เปรียบเทียบระหว่าง $M(3000)F2_{Obs}$ กับ $M(3000)F2_{IRI}$ ของสถานีโกโตตางัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

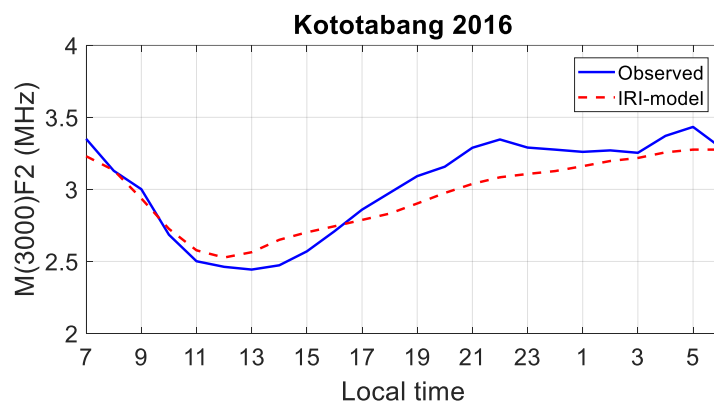
ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2554 ซึ่งมีค่าประมาณ 2.610 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2553 มีค่าประมาณ 3.251 MHz ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการผันผวนของข้อมูลเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้หลายช่วงฤดูกาล คือในปี พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2559, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ส่งผลให้ค่าต่ำสุดที่ได้เกิดในช่วงเวลาฤดูกาลในปี Low solar activity แทนที่จะเกิดในช่วงฤดูกาลในปี High solar activity ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2556 ซึ่งมีค่าประมาณ 2.655 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าประมาณ 3.258 MHz

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

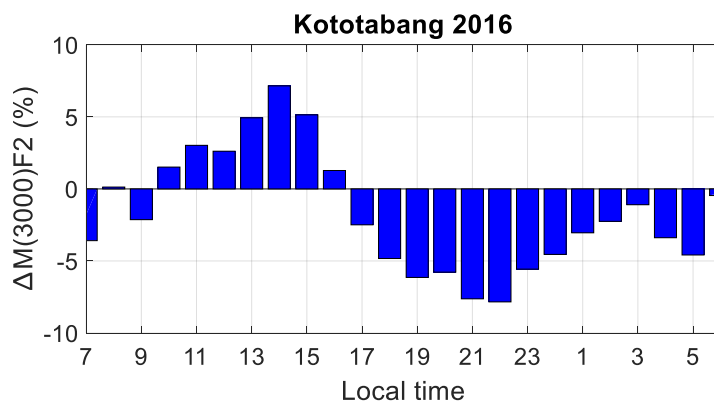
ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีโกโตตาบัง								
ปี พ.ศ.	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	3.153	3.085	3.251	3.229	3.212	3.033	2.864	2.888
2554	2.980	2.974	3.184	3.107	2.912	2.859	2.610	2.713
2555	2.961	2.882	3.087	3.083	2.924	2.865	2.780	2.737
2556	3.002	2.908	3.100	3.064	2.996	2.783	N/A	2.655
2557	N/A	2.811	N/A	3.001	N/A	2.805	2.698	2.719
2558	2.898	2.914	3.119	3.120	3.067	2.930	2.744	2.837
2559	3.166	2.993	3.160	3.189	N/A	3.024	N/A	2.935
2560	N/A	3.064	N/A	3.228	N/A	3.062	N/A	2.977
2561	N/A	3.107	N/A	3.258	N/A	3.090	N/A	2.988

4.1.3.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปีที่สถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย ได้ทำการเลือกปี พ.ศ. 2559 จากข้อมูลที่มีทั้งหมดมาทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} เทียบกับ M(3000)F2_{IRI} แบบรายปี พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ทั้ง 2 แบบมีค่าลดลงในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นจนลดลงต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงถึงบ่ายโมง หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 04.00-06.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 3.43 MHz และ 2.44 MHz และค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} มีค่าสูงสุดและต่ำสุดอยู่ที่ 3.28 MHz และ 2.53 MHz ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี



รูปที่ 4.20 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบระหว่าง M(3000)F2_{Obs} กับ M(3000)F2_{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

จากรูปที่ 4.20 โดยที่ผลเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบรายปี ที่สถานีโกโตตาบั้ง พบว่าในช่วงเวลากลางวันหรือช่วงเวลา 09.00-16.00 น. ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} จะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} แต่ในช่วงเวลาหลังจากเวลาประมาณ 16.00 น. ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} จะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ในช่วง -7.84% ถึง 7.15% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีโกโตตาบั้ง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ปี พ.ศ.	ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีโกโตตาบั้ง							
	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)		เวลากลางวัน (07.00-17.00)		เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)		เวลากลางคืน (20.00-04.00)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	3.350	3.287	2.767	2.798	3.033	2.897	3.335	3.210
2554	3.270	3.219	2.597	2.695	2.726	2.792	3.254	3.107
2555	3.321	3.198	2.537	2.658	2.696	2.696	3.233	3.058
2556	3.283	3.191	2.531	2.635	2.691	2.695	3.246	3.061
2557	N/A	3.171	N/A	2.605	N/A	2.643	N/A	3.016
2558	3.315	3.227	2.550	2.687	2.744	2.747	3.216	3.101
2559	3.368	3.275	2.713	2.760	3.041	2.847	3.289	3.172
2560	N/A	3.303	N/A	2.790	N/A	2.890	N/A	3.220
2561	N/A	3.320	N/A	2.815	N/A	2.928	N/A	3.252

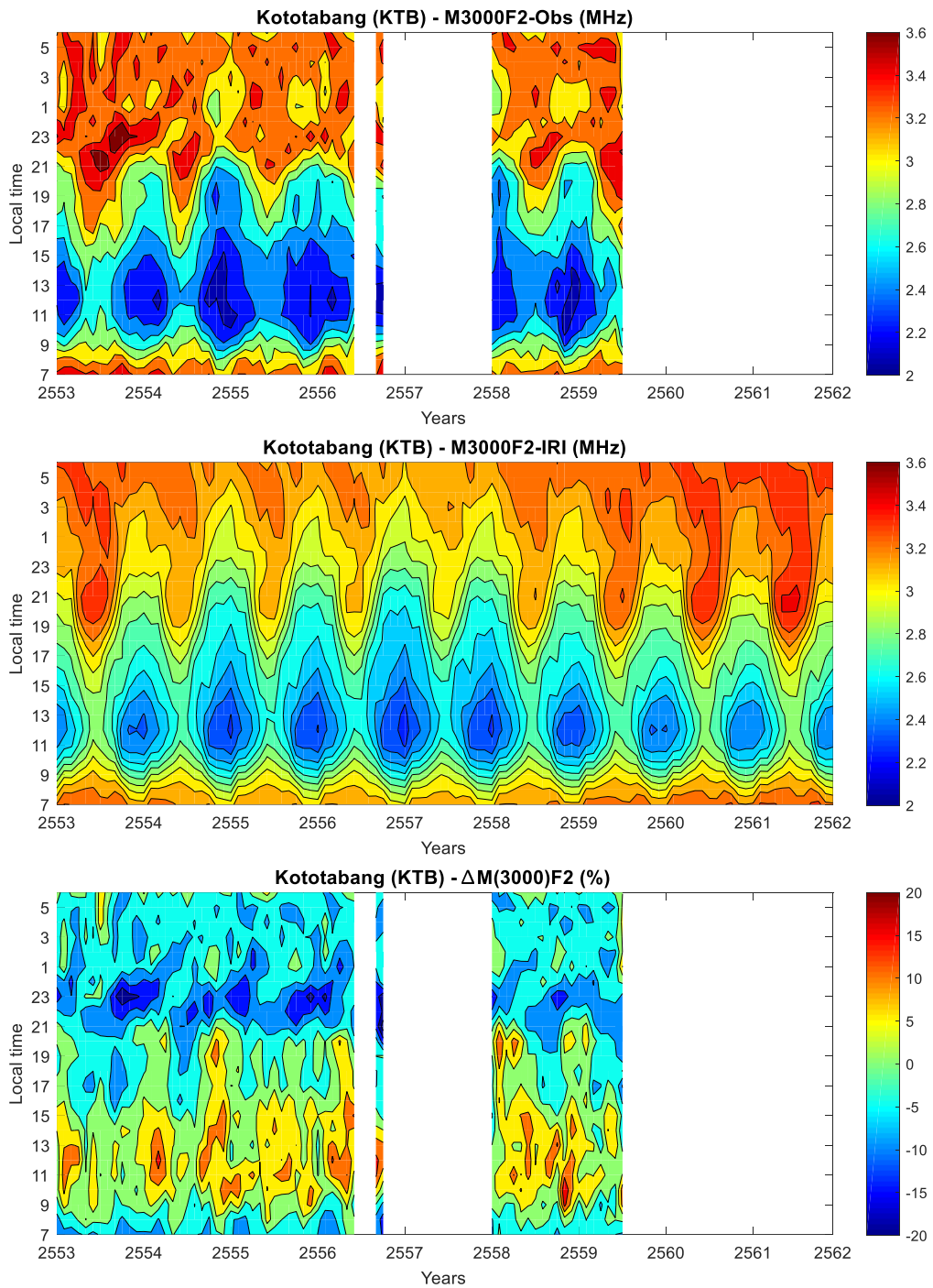
จากตารางที่ 4.6 ผลการแสดงผลค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของสถานีโกโตตาบั้ง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2556 ในช่วงเวลากลางวันประมาณ 07.00-17.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 2.531 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2559 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นประมาณ 05.00-06.00 น. มีค่าประมาณ 3.368 MHz ซึ่งปีที่ไม่มีข้อมูลของสถานีโกโตตาบั้ง คือปี พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ช่วงเวลากลางวันประมาณ 07.00-17.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 2.605 MHz และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. มีค่าประมาณ 3.32 MHz

4.1.3.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงค่าความแตกต่างของพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของชั้น F2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมกับแบบจำลอง IRI-2016 ของสถานี โกโตตาบัง โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.21

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) พบว่าค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} จะมีค่าต่ำอยู่ในช่วงเวลากลางวันในช่วงเวลาประมาณ 10.00-17.00 น. มีค่าประมาณ 2.0 MHz ถึง 2.3 MHz และมีค่าต่ำที่สุดประมาณตุลาคม พ.ศ. 2556 มีค่าประมาณ 2.062 MHz ในช่วงเวลา 11.00-13.00 น. และหลังจากนั้นค่า M(3000)F2_{Obs} จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงหลังพระอาทิตย์ตกดินไปแล้ว เช่นเดียวกับสถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพร ในช่วงเวลาประมาณ 19.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 3.2 MHz ถึง 3.6 MHz และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.616 MHz ในช่วงประมาณเดือนกรกฎาคมพ.ศ. 2560 เวลาประมาณ 21.00-23.00 น. แต่จะมีข้อมูลหลายปีที่ไม่สามารถเก็บค่าได้ คือปี พ.ศ. 2556, พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2559, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ตามลำดับ จึงส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสถานีอื่น ๆ

และเมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{RI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) พบว่าในแต่ละปีค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{RI} จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือ จะมีค่าต่ำในช่วงกลางวันเวลาประมาณ 09.00-18.00 น. มีค่าประมาณ 2.3 MHz ถึง 2.5 MHz โดยมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2557 มีค่าประมาณ 2.243 MHz ในช่วงเวลา 11.00-13.00 น. ซึ่งเป็นช่วงฤดู December Solstice ในปีที่เป็น High solar activity และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.2 MHz ถึง 3.5 MHz ในช่วงปี พ.ศ. 2553 และอีกช่วงในปี พ.ศ. 2560 ถึง พ.ศ. 2561 โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.422 MHz ในเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งเป็นช่วงฤดู June Solstice ซึ่งเป็นปีที่เป็น Low solar activity จึงทำให้มีค่า foF2 ต่ำที่สุดและส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{RI} มีค่ามากที่สุด



รูปที่ 4.21 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า $M(3000)F2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) สถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{Obs}$ และค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2_{RI}$ มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปร่าง) พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนใหญ่ในช่วงเวลากลางวันอยู่ในช่วงระหว่าง 0% ถึง 5% และในช่วงเวลากลางคืนอยู่ในช่วงระหว่าง -5% ถึง -10% โดยที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของปีทั้งหมดอยู่ระหว่าง -23 ถึง 20% โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนต่ำที่สุดประมาณ -22.99% อยู่ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2556 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนสูงที่สุดประมาณ 19.76% อยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2558 ตามลำดับ

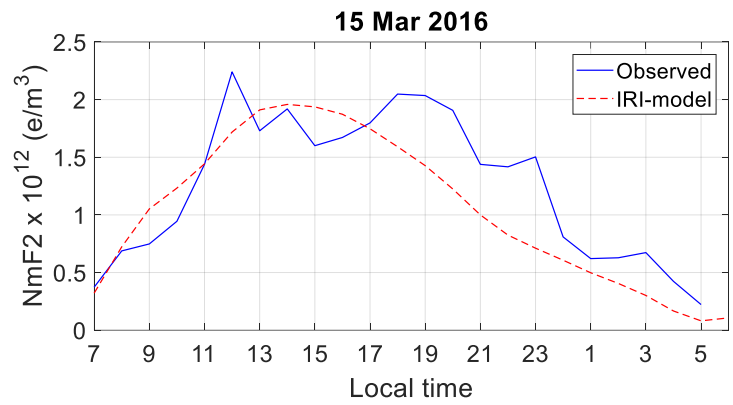
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 4.2 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 และทำการศึกษาจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานี คือสถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) ของชั้น F2 เป็นแบบรายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 สถานีเชียงใหม่

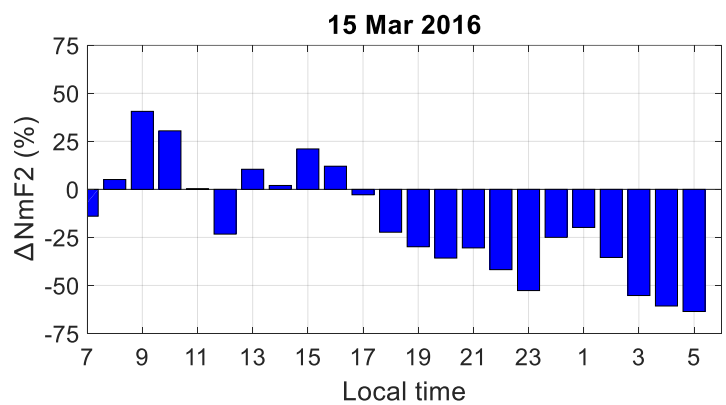
4.2.1.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายวัน

แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายวันทั้งของ $NmF2_{Obs}$ และ $NmF2_{RI}$ พบว่ามีลักษณะคล้ายรูปประฆังคว่ำแต่จะมีค่าค่อนข้างแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูลมีการสวิงของค่าพารามิเตอร์ในช่วงเวลาที่ต่างกัน กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ จะมีเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันหรือช่วงเวลาประมาณ 07.00-18.00 น. จนมีค่าสูงสุดประมาณ $2.24 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และมีค่าลดลงในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดินไปแล้วหรือช่วงเวลา 19.00 น. มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ $0.22 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 05.00-15.00 น. มีค่าสูงสุดประมาณ $1.95 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และหลังจากนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. จนมีค่าต่ำสุดประมาณ $0.08 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

จะเห็นได้ว่าค่า $\Delta NmF2(\%)$ หรือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้ง 2 แบบ จากรูปที่ 4.23 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ส่วนใหญ่ในช่วงเวลากลางวันจะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดอยู่ที่ 40.61% แต่ในช่วงเวลากลางคืนค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} จะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} โดยมีค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -63.57% ถึง -2.8%

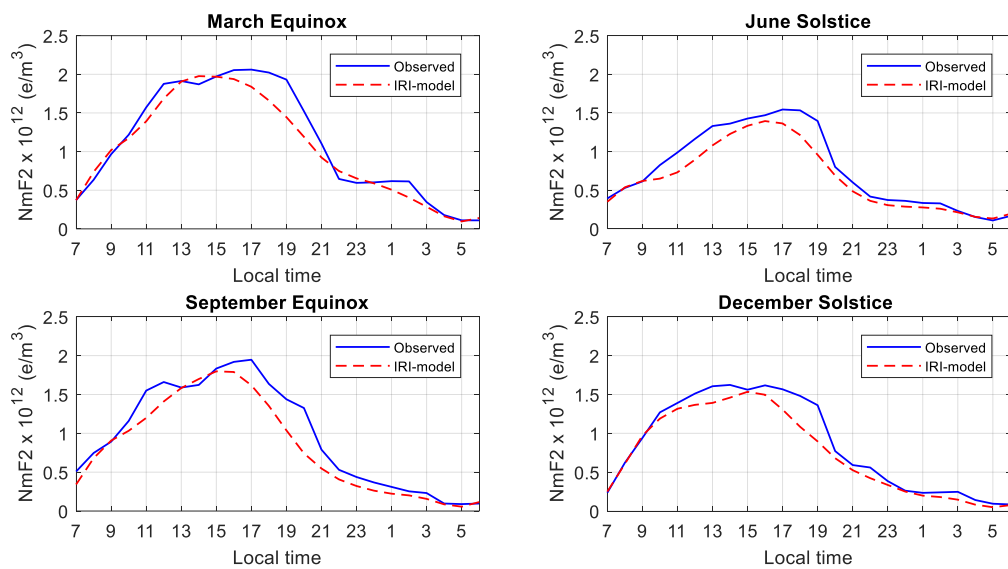


รูปที่ 4.23 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

4.2.1.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายฤดูกาล

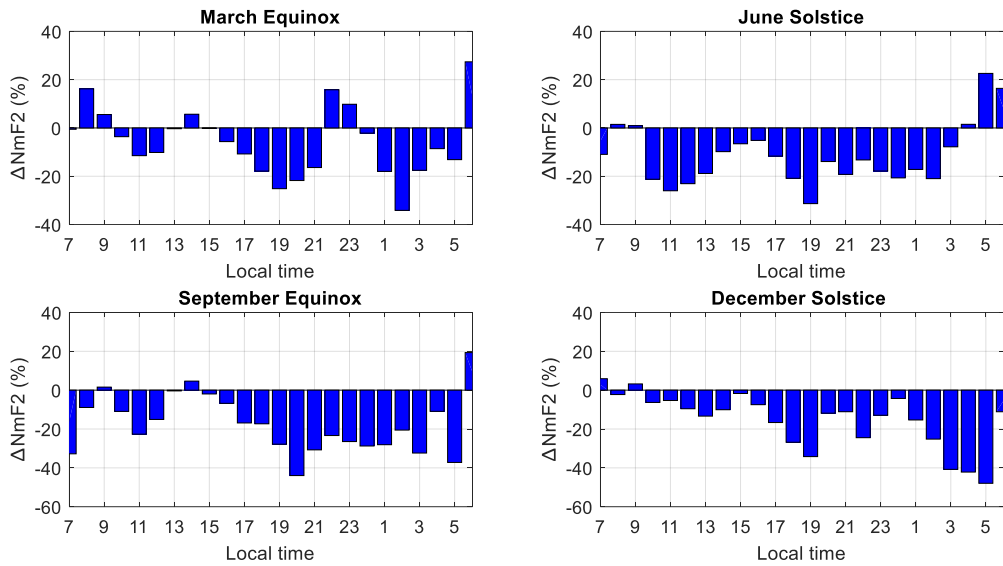
แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของทั้ง 4 ฤดูกาล พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันและเริ่มลดลงในช่วงเวลาเย็นจนถึงเวลากลางคืน ทั้งแบบ NmF2_{Obs} และ NmF2_{IRI} ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ในช่วงฤดู March Equinox จะมี

ค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.06×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.11×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู June Solstice จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.54×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.11×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.95×10^{12} e/m³ ค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.09×10^{12} e/m³ และช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.62×10^{12} e/m³ ค่าต่ำสุดอยู่ที่ 0.08×10^{12} e/m³ ดังนั้นในช่วงฤดูที่มีค่ามากที่สุดของพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} คือช่วงฤดู March Equinox และช่วงฤดูที่มีค่าต่ำที่สุดคือ ช่วงฤดู December Solstice และเมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} พบว่าช่วงฤดูที่มีค่ามากที่สุดคือ March Equinox มีค่าประมาณ 1.98×10^{12} e/m³ ในขณะที่ค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงฤดู December Solstice มีค่าประมาณ 0.049×10^{12} e/m³ ซึ่งเป็นช่วงฤดูเดียวกันกับค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

เมื่อเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูลส่วนใหญ่มีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง โดยที่ในช่วงฤดู March Equinox มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -34.13% ถึง 27.38% ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -31.34% ถึง 22.59% ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -43.97% ถึง 19.34% และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -47.94% ถึง 5.89% ตามลำดับ



รูปที่ 4.25 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

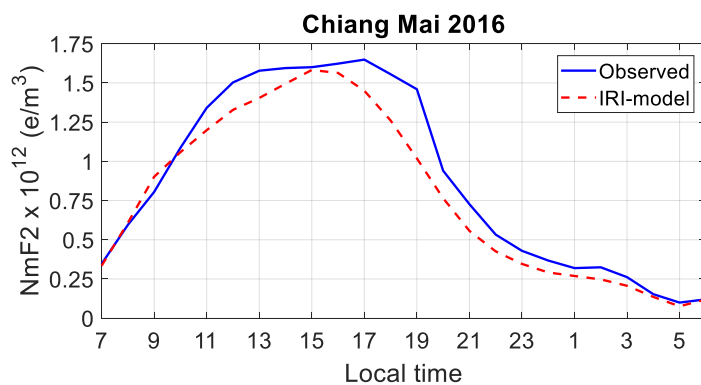
ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ NmF2x10 ¹² e/m ³ ของสถานีเชียงใหม่								
ปี พ.ศ.	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	0.850	0.714	0.548	0.541	N/A	0.734	0.554	0.683
2554	1.348	0.985	0.984	0.785	1.589	1.268	1.487	1.368
2555	1.550	1.580	1.232	0.914	1.454	1.319	0.825	1.352
2556	1.354	1.492	1.227	0.936	1.414	1.550	1.620	1.601
2557	N/A	1.850	1.090	1.105	1.991	1.613	1.877	1.583
2558	2.095	1.636	0.980	0.875	1.125	1.080	1.054	0.914
2559	0.951	0.978	0.621	0.600	0.826	0.718	0.449	0.522
2560	0.617	0.662	0.506	0.490	0.618	0.592	0.383	0.410
2561	0.572	0.580	0.441	0.422	0.601	0.444	0.826	0.335

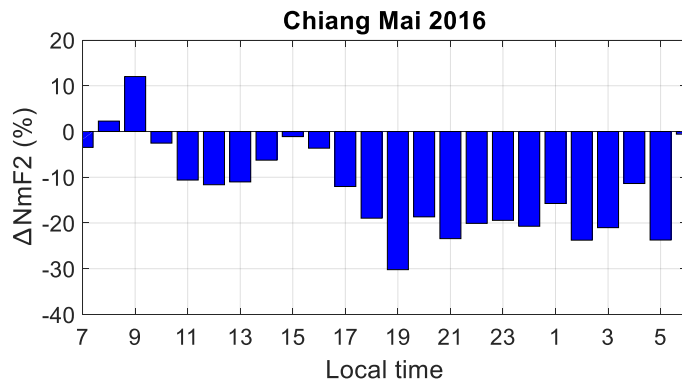
จากตารางที่ 4.7 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2560 ซึ่งมีค่าประมาณ 0.383×10^{12} e/m³ โดยเป็นปีที่มีค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำที่สุดในชั้นบรรยากาศ (Low solar activity) [27] จึงส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ NmF2 มีค่าต่ำที่สุดด้วย เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จะมีค่าแปรผันตามกับค่าความถี่วิกฤต และมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2558 (High solar activity) [27] มีค่าประมาณ 2.095×10^{12} e/m³ ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดในช่วงฤดู December Solstice ในปี พ.ศ. 2561 ซึ่งมีค่าประมาณ 0.335×10^{12} e/m³ และมีค่าสูงที่สุดในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2557 มีค่าประมาณ 1.850×10^{12} e/m³ ตามลำดับ

4.2.1.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายปี

จากการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} เทียบกับค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่สถานีเชียงใหม่ในปี พ.ศ. 2559 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้ง 2 แบบมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นจนถึงช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ตก หรือประมาณช่วงเวลา 06.00-17.00 น. และหลังจากนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีค่าสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลาประมาณ 17.00 น. มีค่าประมาณ 1.65×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.1×10^{12} e/m³ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าสูงสุดที่เวลา 15.00 น. มีค่าประมาณ 1.58×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดที่เวลาประมาณ 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.076×10^{12} e/m³ ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี



รูปที่ 4.27 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีเชียงใหม่ ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $\Delta NmF2(\%)$ จากรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ยกเว้นในช่วงเวลา 07.00-10.00 น. จะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} โดยมีเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงความแตกต่างอยู่ระหว่าง -30.20% ถึง 12.01%

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

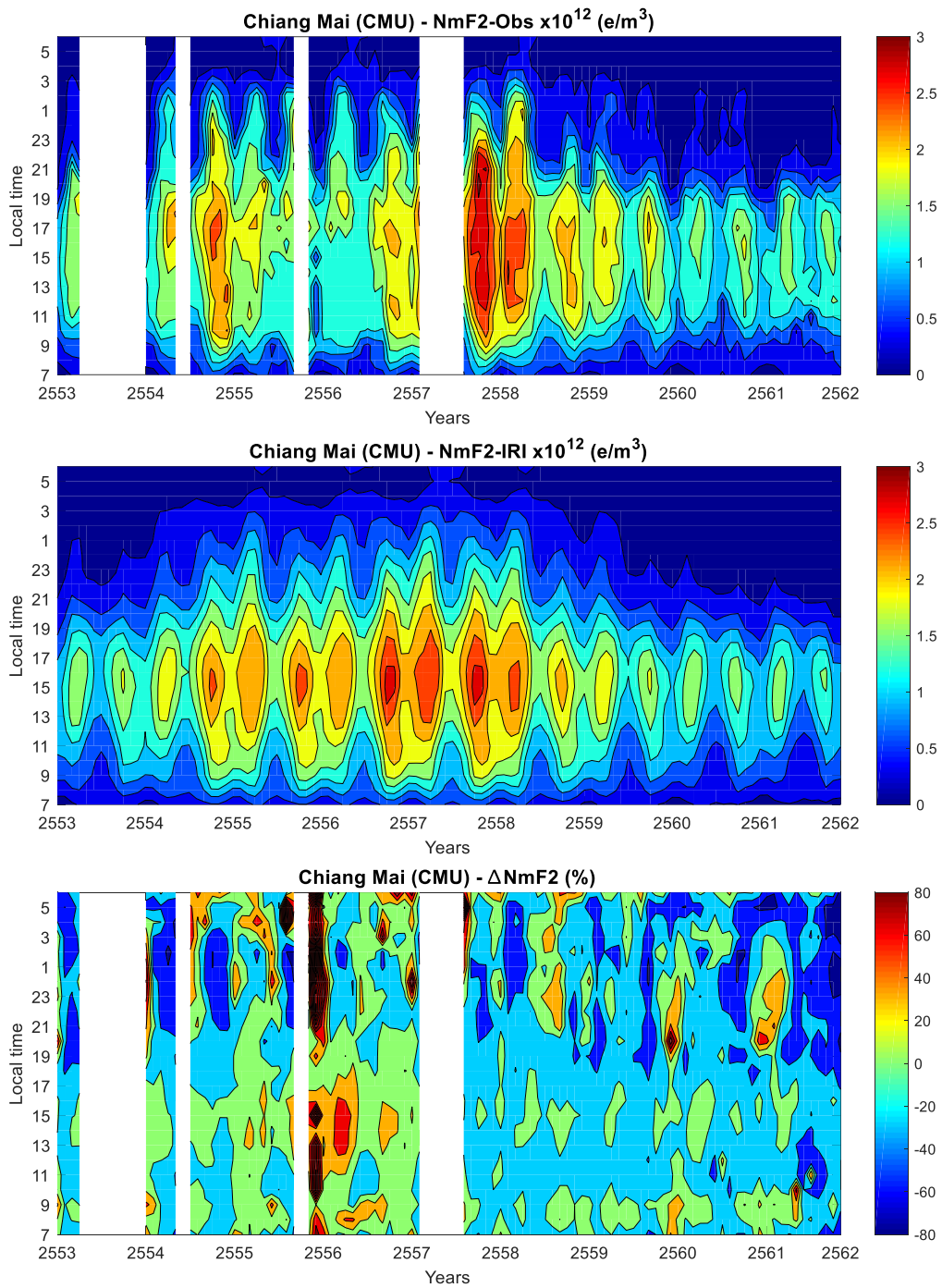
ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ NmF2x10 ¹² e/m ³ ของสถานีเชียงใหม่								
ปี พ.ศ.	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)		เวลากลางวัน (07.00-17.00)		เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)		เวลากลางคืน (20.00-04.00)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	0.078	0.096	1.031	1.071	1.203	1.049	0.260	0.251
2554	0.138	0.177	1.449	1.408	1.997	1.508	0.809	0.551
2555	0.140	0.204	1.406	1.707	1.641	1.823	0.748	0.794
2556	0.155	0.228	1.382	1.756	1.695	1.930	0.779	0.841
2557	0.164	0.242	2.074	1.944	2.397	2.093	1.174	0.989
2558	0.194	0.182	1.680	1.608	1.926	1.696	0.635	0.657
2559	0.110	0.107	1.295	1.208	1.529	1.135	0.390	0.322
2560	0.090	0.074	1.128	1.035	1.344	0.884	0.259	0.200
2561	0.097	0.059	1.140	0.920	1.154	0.758	0.195	0.140

ผลการแสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2553 ซึ่งเป็นปีที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์น้อย (Low solar activity) ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นประมาณ 05.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ $0.078 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นปีที่ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มาก (High solar activity) ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินประมาณ 18.00-19.00 น. มีค่าประมาณ $2.397 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ซึ่งมีค่าประมาณ $0.059 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินประมาณ 18.00-19.00 น. มีค่าประมาณ $2.093 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล

4.2.1.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ตั้งแต่ปี พ.ศ 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) ของชั้น F2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมกับแบบจำลอง IRI-2016 ของสถานีเชียงใหม่ โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 แสดงดังรูปที่ 4.28

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ที่สามารถหาได้จากสมการที่ 4.2 นั้นพบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงหลายปีที่คล้ายคลึงกัน คือเมื่อช่วงพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 08.00-09.00 น. ไปจนถึงช่วงพระอาทิตย์ตกเวลาประมาณ 17.00-19.00 น. จะมีค่า NmF2_{Obs} อยู่ในช่วงประมาณ $1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $3.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ โดยจะมีค่าสูงสุดประมาณ $3.133 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2557 เวลาประมาณ 19.00-21.00 น. เป็นช่วงฤดู Solstice ซึ่งเป็นปีที่มีค่าความถี่วิกฤตในชั้นบรรยากาศมากที่สุดจากการแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์จากการยึดตำแหน่งของดวงอาทิตย์เป็นหลัก (High solar activity) จึงส่งผลทำให้ค่าพารามิเตอร์ NmF2 มีค่ามากที่สุด เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จะมีค่าแปรผันตามกับค่าความถี่วิกฤต แต่ในช่วงเวลากลางคืนค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 03.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ $0.061 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2553 ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์น้อย (Low solar activity) นั่นเอง แต่ก็มีข้อมูลบางช่วงไม่สามารถเก็บค่าได้เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2_{Obs}



รูปที่ 4.28 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) พบว่าในแต่ละปีค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ จะมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างปีที่เป็น High solar activity ซึ่งเป็นปีระหว่าง พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2558 ซึ่งปีที่เป็น High solar activity จะมีค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ สูงกว่าอยู่ในช่วงระหว่าง $1.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $2.75 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลาประมาณ 08.00-21.00 น. และปีที่เป็น Low solar activity ซึ่งเป็นปีระหว่าง พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2554 และอีกช่วงคือปี พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2561 ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ อยู่ในช่วงประมาณ $1.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.8 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ช่วงเวลาประมาณ 10.00-18.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ ที่มีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นช่วงฤดู Solstice และเป็นปีที่เป็น High solar activity เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ โดยมีค่าประมาณ $2.848 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 มีค่าประมาณ $0.018 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลา 03.00-06.00 น. ซึ่งเป็นปีที่เป็น Low solar activity นั่นเอง

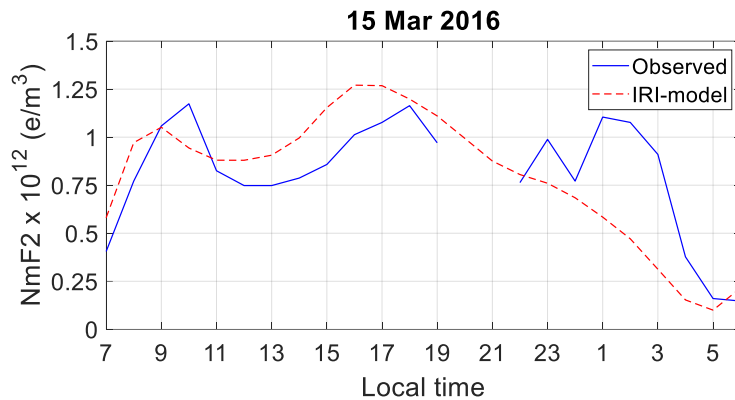
จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ และค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) จากสมการที่ 4.4 พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีความแตกต่างกันส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง -20% ถึง 10% ในช่วงเวลากลางวัน ทำให้ค่า $NmF2_{Obs}$ มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่ามากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่า $NmF2_{IRI}$ และในช่วงเวลากลางคืนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ระหว่าง -80 ถึง -20% จึงผลส่งทำให้ค่า $NmF2_{Obs}$ มีค่ามากกว่า $NmF2_{IRI}$ นั่นเอง โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนต่ำที่สุดประมาณ -77.95% อยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2561 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนสูงที่สุดมีค่ามากกว่า 80% อยู่ในช่วงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2557

4.2.2 สถานีชุมพร

4.2.2.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $NmF2$ แบบรายวัน

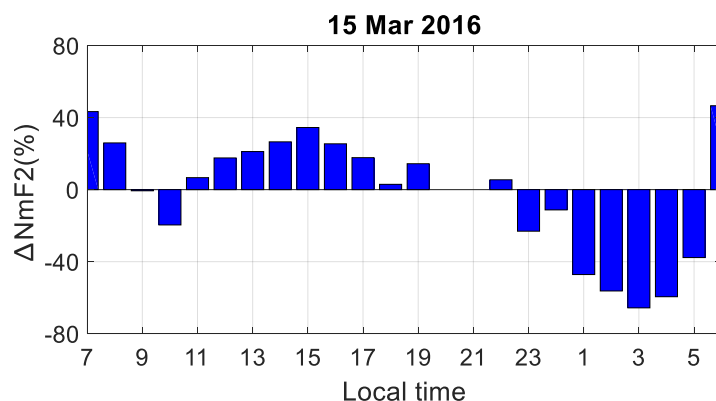
ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $NmF2$ เปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ กับ $NmF2_{IRI}$ พบว่าทั้ง 2 แบบมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 05.00-10.00 น. มีค่าสูงสุดประมาณ $1.17 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ จากนั้นจะมีค่า $NmF2_{Obs}$ ลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 10.00-13.00 น. เนื่องจากเกิดการพัดพาของอิเล็กตรอนไปในทิศทางอื่น ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในบริเวณสถานีที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศของบริเวณดังกล่าวมีจำนวนลดลง จึงส่งผลให้ค่าความแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด ($NmF2$) มีค่าลดลงด้วย และจากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ตกในช่วงเวลาประมาณ 13.00-18.00 น. และมีค่าลดลงอีกครั้งหลังจากพระอาทิตย์ตกดินไปแล้วเพราะไม่ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ แต่ในช่วงเวลาประมาณ 01.00 น. ค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ มีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งมีค่าประมาณ $1.104 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และลดลงจนมีค่าต่ำสุดที่เวลา 06.00 น. มีค่าประมาณ $0.147 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{IRI}$ ค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 05.00-09.00 น. และลดลงในช่วงเวลา 10.00-12.00 น. ก่อนที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีก

ครั้งจนถึงค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 16.00-17.00 น. มีค่าประมาณ 1.27×10^{12} e/m³ จากนั้นเมื่อหลังจากเวลา 17.00-18.00 น. หรือช่วงที่พระอาทิตย์ตกดินไปแล้วจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนที่ค่าต่ำสุดที่เวลาประมาณ 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.10×10^{12} e/m³ ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้ง 2 แบบมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 พบว่าในช่วงเวลา 06.00-08.00 น. และในช่วงเวลา 11.00-22.00 น. ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลองมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยมีค่าความแตกต่างสูงสุดอยู่ประมาณ 46.57% แต่ในช่วงเวลา 09.00-10.00 น. และในช่วงเวลา 23.00-05.00 น. ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยมีค่าความแตกต่างอยู่ประมาณ -65.65%

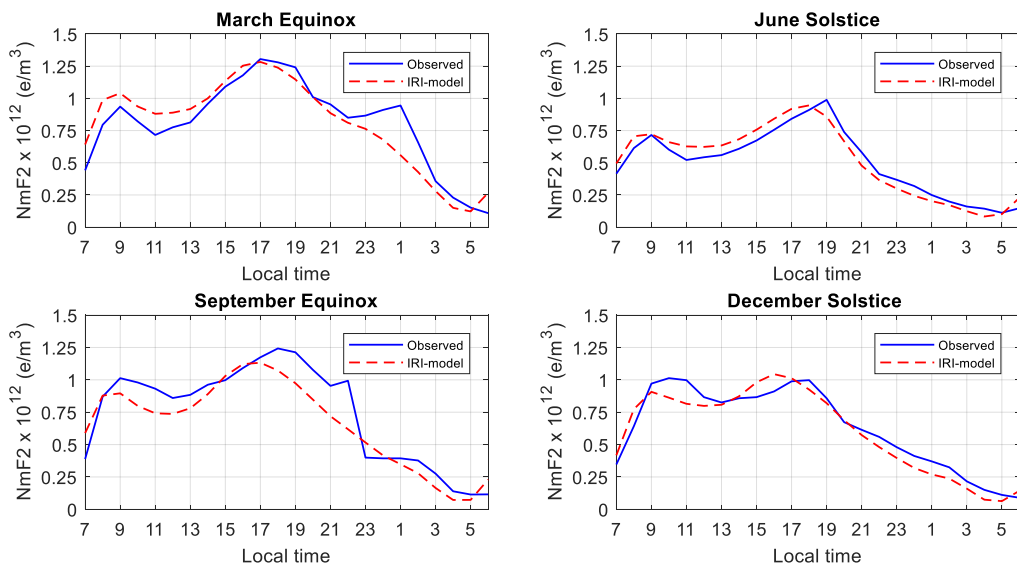


รูปที่ 4.30 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีชุมพร ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

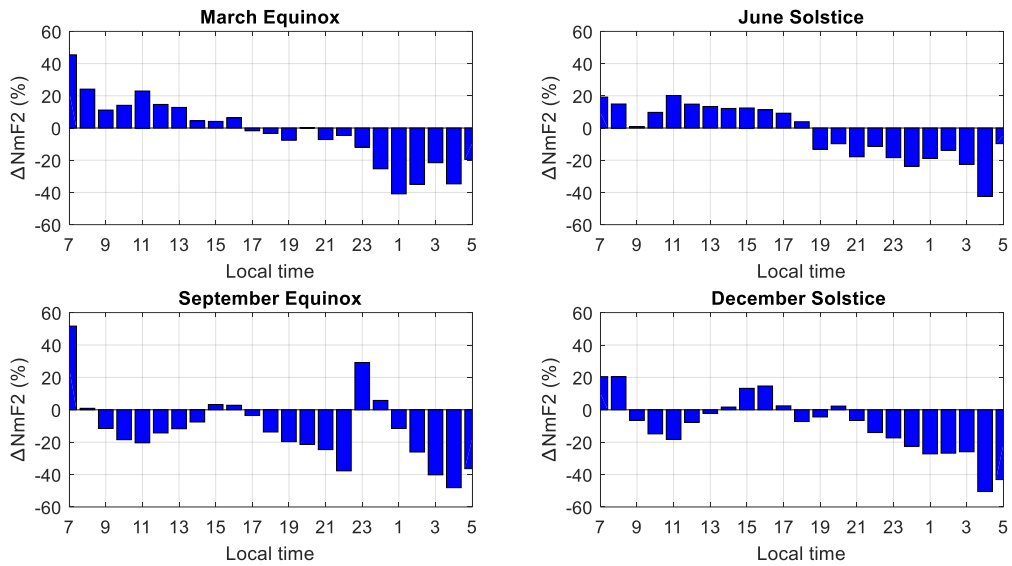
4.2.2.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายฤดูกาล

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ที่สถานีชุมพร แบบรายฤดูกาล จากรูปที่ 4.31 พบว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของทั้ง 4 ฤดูกาลมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเช้าเวลาประมาณ 07.00-09.00 น. และมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 10.00-13.00 น. จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุดสูงสุดที่เวลาพระอาทิตย์ตกดิน เวลาประมาณ 17.00-19.00 น. และในช่วงเวลากลางคืนจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดต่ำสุดที่เวลาประมาณ 05.00-06.00 น.

ถ้าพิจารณาค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} พบว่าในช่วงฤดู March Equinox มีค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 17.00 น. มีค่าประมาณ 1.31×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้นเวลา 06.00 น. มีค่าประมาณ 0.11×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดประมาณ 0.99×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.10×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าสูงสุดประมาณ 1.24×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.11×10^{12} e/m³ และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดประมาณ 1.01×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดประมาณ 0.09×10^{12} e/m³ โดยที่ในช่วงฤดู Equinox จะมีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} สูงกว่าช่วงฤดู Solstice ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าสูงสุดในช่วงฤดู March Equinox มีค่าประมาณ 1.28×10^{12} e/m³ และช่วงต่ำสุดที่ฤดู December Solstice มีค่าประมาณ 0.06×10^{12} e/m³ ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล



รูปที่ 4.32 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

เมื่อทำการพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ที่สถานีชุมพร ในรูปที่ 4.32 พบว่าในช่วงเวลากลางวันค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล ซึ่งอยู่ในช่วงฤดู March Equinox และช่วงฤดู June Solstice ส่วนในช่วงฤดู September Equinox และฤดู December Solstice ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า NmF2_{Obs} ในขณะที่ในช่วงเวลากลางคืนค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันในช่วงฤดู March Equinox อยู่ระหว่าง -40.87% ถึง 45.41% ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -42.51% ถึง 20.2% ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -48.10% ถึง 51.67% และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง -50.47% ถึง 20.44% ตามลำดับ

แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2561 (Low solar activity) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.416×10^{12} e/m³ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2557 (High solar activity) มีค่าประมาณ 1.224×10^{12} e/m³ และมีปีที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้บางส่วน คือปี พ.ศ. 2554, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2561 ซึ่งมีค่าประมาณ 0.440×10^{12} e/m³ และมีค่าสูงที่สุดอยู่

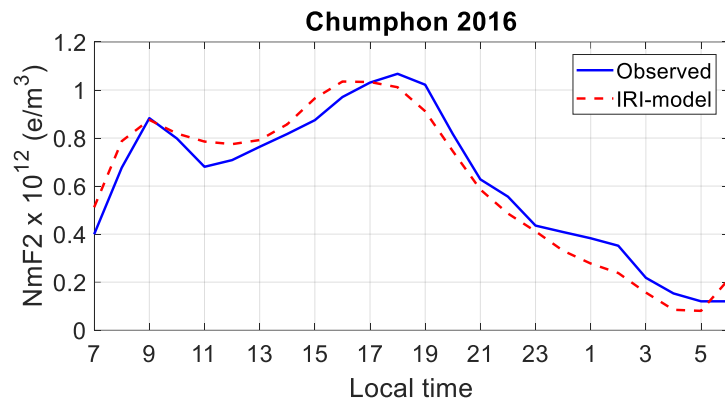
ในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งมีค่าประมาณ $1.344 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs}

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

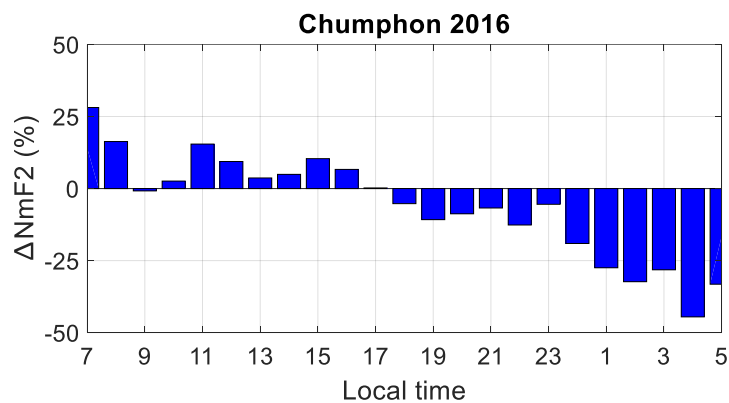
ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ $\text{NmF2} \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ของสถานีชุมพร								
ปี พ.ศ.	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	0.695	0.708	0.485	0.544	0.709	0.708	0.627	0.664
2554	N/A	0.872	N/A	0.815	N/A	1.076	0.735	0.999
2555	0.995	1.212	0.822	0.916	0.997	1.101	0.771	1.017
2556	1.026	1.165	0.879	0.973	1.001	1.231	0.938	1.144
2557	1.224	1.344	1.081	1.096	1.200	1.284	0.962	1.147
2558	1.166	1.247	0.718	0.884	0.712	0.978	0.624	0.799
2559	0.883	0.887	0.456	0.608	0.902	0.681	0.645	0.607
2560	N/A	0.705	N/A	0.510	N/A	0.598	N/A	0.549
2561	0.505	0.649	0.416	0.440	N/A	0.512	N/A	0.549

4.2.2.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายปี

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้งแบบ NmF2_{Obs} และ NmF2_{IRI} ที่สถานีชุมพร แบบรายปี พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันมาก คือจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 05.00-09.00 น. และมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 10.00-13.00 น. จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00-19.00 น. และหลังจากนั้นมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีค่าสูงสุดประมาณ $1.07 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลา 18.00 น. และมีค่าต่ำสุดประมาณ $0.12 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าสูงสุดประมาณ $1.03 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลา 16.00 น. และค่าต่ำสุดประมาณ $0.08 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี



รูปที่ 4.34 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีชุมพร ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

จากรูปที่ 4.34 เมื่อนำมาหาเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ในปี พ.ศ. 2559 พบว่าในช่วงเวลากลางวัน เวลาประมาณ 07.00-17.00 น. ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} จะมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ส่วนช่วงเวลากลางคืนเวลาประมาณ 18.00-05.00 น. ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} จะมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} โดยมีเปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -44.53% ถึง 28.12%

ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2553 (Low solar activity) ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นประมาณ 05.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 0.082×10^{12} e/m³ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 (High solar activity) ในช่วงเวลากลางวันประมาณ 07.00-17.00 น. มีค่าประมาณ 1.263×10^{12} e/m³ และมีข้อมูลบางปีที่ไม่

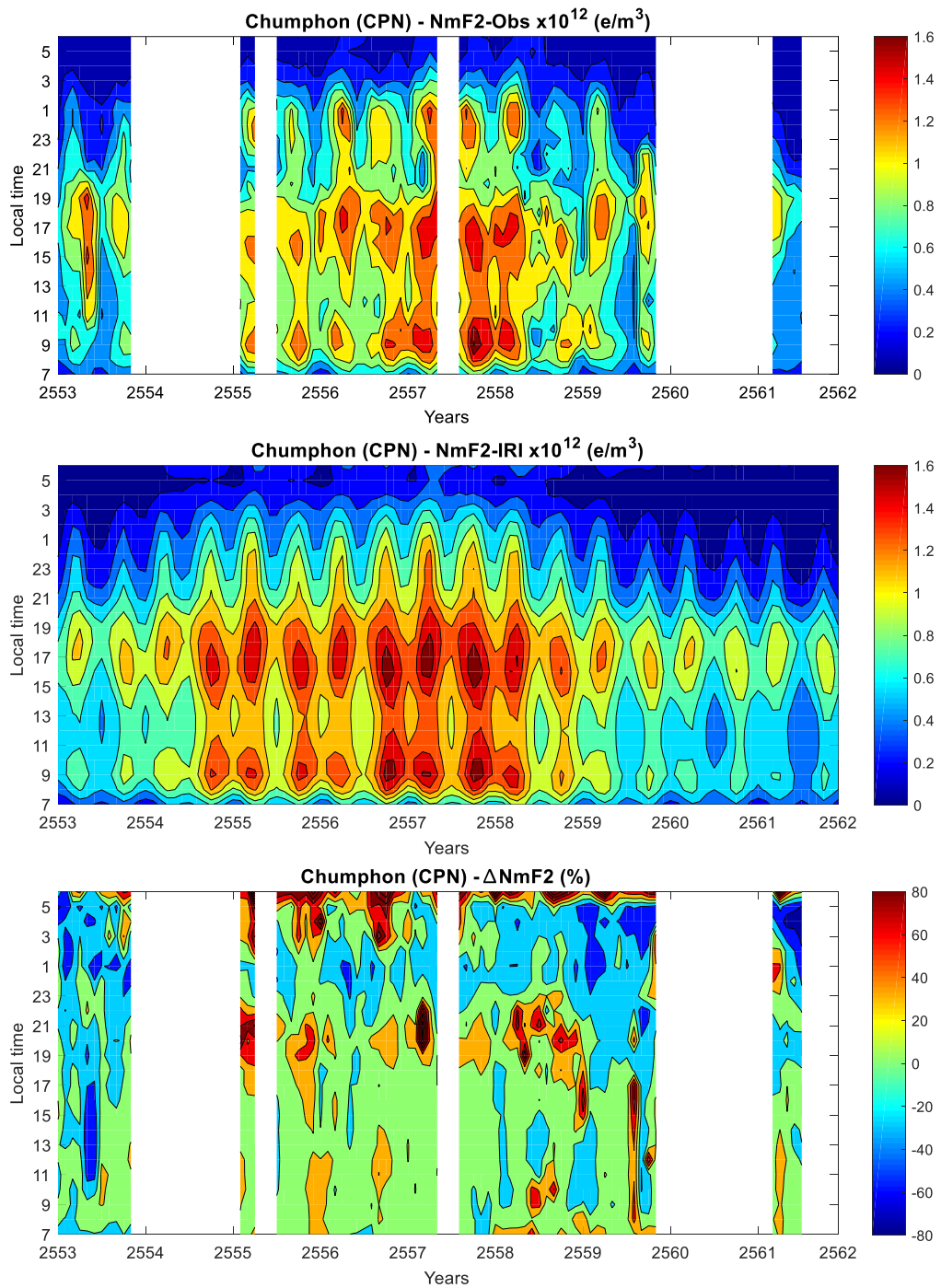
สามารถเก็บข้อมูลได้ คือปี พ.ศ. 2554 และ พ.ศ. 2560 ขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 (Low solar activity) ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ซึ่งมีค่าประมาณ $0.066 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินประมาณ 18.00-19.00 น. มีค่าประมาณ $1.443 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ปี พ.ศ.	ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ NmF2 $\times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ของสถานีชุมพร							
	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)		เวลากลางวัน (07.00-17.00)		เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)		เวลากลางคืน (20.00-04.00)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	0.082	0.071	0.687	0.708	0.949	0.924	0.368	0.315
2554	N/A	0.166	N/A	0.947	N/A	1.188	N/A	0.555
2555	0.132	0.223	1.028	1.187	1.002	1.268	0.598	0.736
2556	0.163	0.251	1.014	1.184	1.183	1.355	0.795	0.780
2557	0.218	0.294	1.263	1.325	1.086	1.443	0.858	0.909
2558	0.165	0.247	1.065	1.131	1.008	1.194	0.572	0.624
2559	0.116	0.139	0.767	0.826	1.026	0.948	0.394	0.349
2560	N/A	0.083	N/A	0.688	N/A	0.865	N/A	0.233
2561	0.100	0.066	0.515	0.630	0.832	0.782	0.166	0.189

4.2.2.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) ของชั้น F2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมกับแบบจำลอง IRI-2016 ของสถานีชุมพร โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 แสดงดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) พบว่าค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ ในช่วงเวลากลางวันมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงในช่วงปีที่เป็น High solar activity คือจะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 08.00-10.00 น. และอีกช่วงคือช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ตกดินในช่วงเวลาประมาณ 14.00-18.00 น. ซึ่งจะมีค่า $NmF2_{Obs}$ อยู่ในช่วงประมาณ $1.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.8 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ โดยจะมีค่าสูงสุดประมาณ $1.834 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 เวลาประมาณ 08.00-09.00 น. และในช่วงเวลากลางคืนค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 03.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าต่ำสุดประมาณ $0.053 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2553 เช่นเดียวกับสถานีเชียงใหม่ ยกเว้นในช่วงปีที่เป็น High solar activity จะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงเวลาประมาณ 23.00-01.00 น. มีค่าประมาณ $1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ส่วนปีที่เป็น Low solar activity ทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนส่วนใหญ่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ คือ พ.ศ. 2554, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 จึงทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ ได้

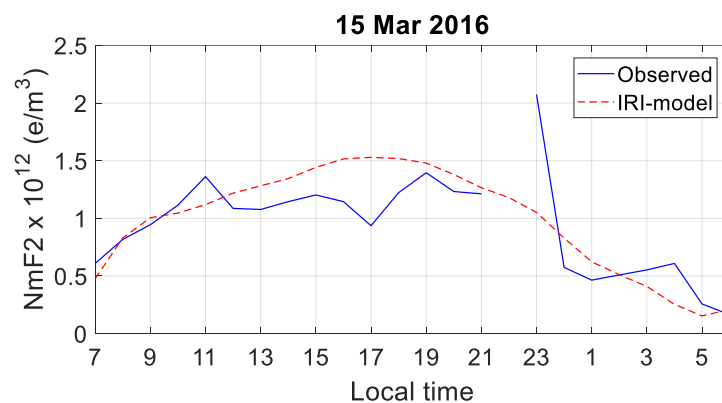
เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) พบว่าในแต่ละปีค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ จะมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างปีที่เป็น High solar activity ซึ่งเป็นปีระหว่าง พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2558 ซึ่งปีที่เป็น High solar activity จะมีค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ สูงกว่าอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 08.00-11.00 น. และอีกช่วงเวลาคือ 14.00-20.00 น. มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง $1.4 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $2.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ อยู่ในช่วงฤดู Equinox และปีที่เป็น Low solar activity ซึ่งเป็นปีระหว่าง พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2554 และอีกช่วงคือปี พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2561 ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ อยู่ในช่วงประมาณ $0.8 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ อยู่ในช่วงเวลาประมาณ 08.00-10.00 น. และช่วงเวลา 15.00-19.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ ที่มีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 โดยมีค่าประมาณ $1.778 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลา 16.00-17.00 น. และค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 มีค่าประมาณ $0.018 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลา 05.00-06.00 น. ซึ่งเป็นปีที่เป็น Low solar activity นั่นเอง

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{Obs}$ และค่าพารามิเตอร์ $NmF2_{RI}$ มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) พบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีความแตกต่างกันส่วนใหญ่ในช่วงเวลากลางวันค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง 0% ถึง 5% และในช่วงเวลากลางคืนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง -25 ถึง -15% โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนต่ำที่สุดประมาณ -77.64% อยู่ในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนสูงที่สุดมีค่ามากกว่า 80% อยู่ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2555

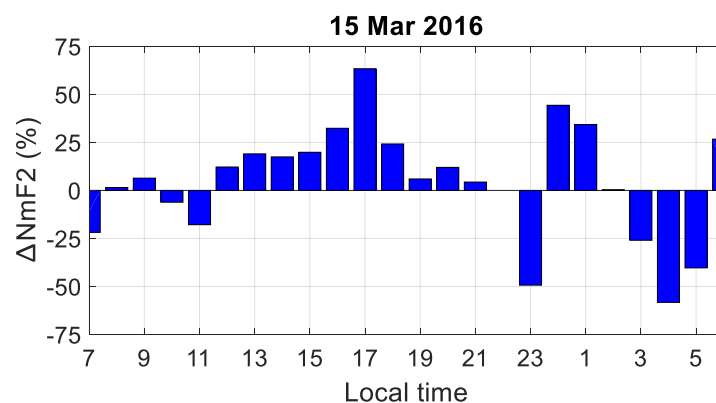
4.2.3 สถานีโกโตต้าง

4.2.3.1 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายวัน

จากผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน จากรูปที่ 4.36 พบว่าผลการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 มีลักษณะคล้ายกัน แตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีการเปลี่ยนแปลงคือ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา ประมาณ 05.00-11.00 น. จากนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 12.00-17.00 น. และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง จนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 23.00 น. มีค่าประมาณ 2.07×10^{12} e/m³ ซึ่งอาจจะเกิดจากปรากฏการณ์ ผิดปกติในชั้น F2 และหลังจากนั้นมีค่าลดลงจนมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. มีค่าประมาณ 0.16×10^{12} e/m³ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีการเปลี่ยนแปลงคือ มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันเวลาประมาณ 06.00-17.00 น. และลดลงในช่วงเวลากลางคืน เวลาประมาณ 18.00-05.00 น. โดยมีค่าสูงสุดอยู่ประมาณ 1.53×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดอยู่ประมาณ 0.15×10^{12} e/m³



รูปที่ 4.36 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีโกโตต้าง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559



รูปที่ 4.37 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายวัน ของสถานีโกโตต้าง ในวันที่ 15 มีนาคม พ.ศ.2559

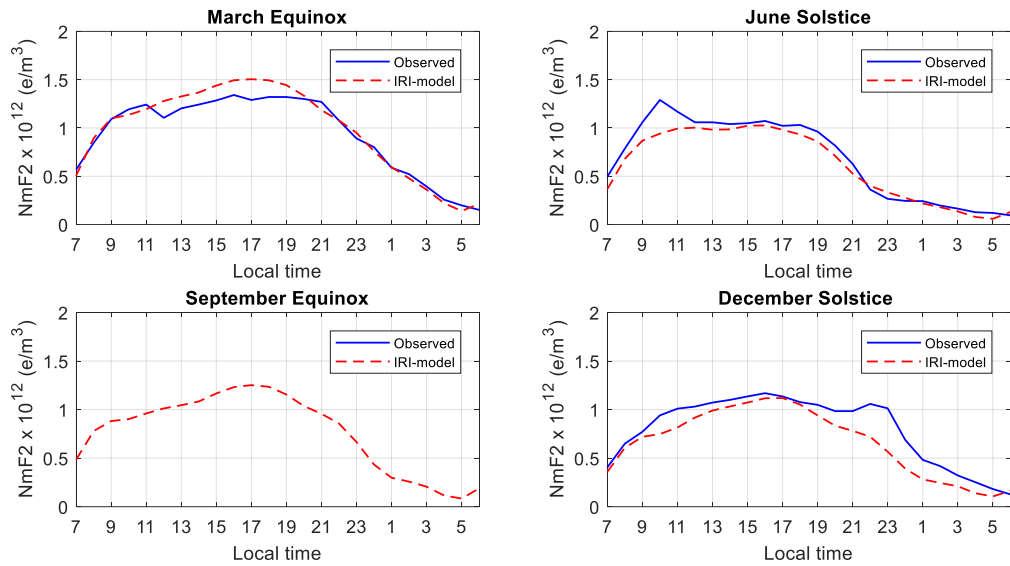
จากรูปที่ 4.37 แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของทั้ง 2 แบบ พบว่าในช่วงเวลากลางวัน ส่วนใหญ่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} และในช่วงเวลากลางคืน ส่วนใหญ่มีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} น้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} แต่ก็มีบางช่วงเวลาประมาณ 00.00-02.00 น. ที่มีค่ามากกว่าค่า NmF2_{Obs} เนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ คือมีค่าสวิตขึ้นลงเป็นบางช่วงเวลา โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวมีความแตกต่างอยู่ระหว่าง -58.28% ถึง 63.37%

4.2.3.2 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายฤดูกาล

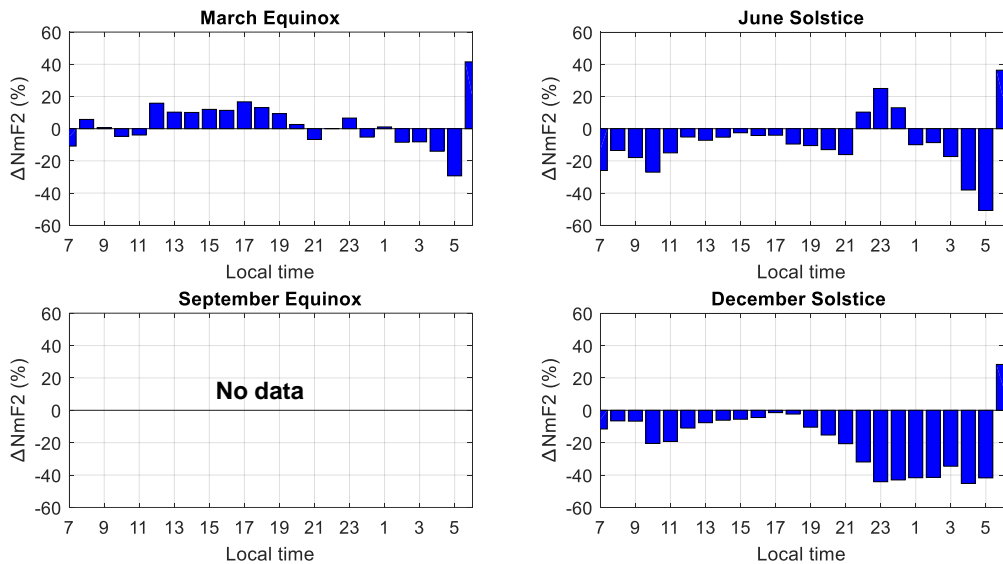
แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} แบบรายฤดูกาลทั้ง 4 แบบจากรูปที่ 4.38 พบว่ามีการผลเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกัน คือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันและลดลงในช่วงเวลากลางคืน

เมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} พบว่าในช่วงฤดู March Equinox พบว่ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ช่วงเวลา 16.00 น. มีค่าประมาณ 1.34×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดที่เวลา 06.00 น. มีค่าประมาณ 0.15×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 10.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 1.29×10^{12} e/m³ มีค่าต่ำสุดในเวลา 06.00 น. มีค่าประมาณ 0.09×10^{12} e/m³ ส่วนในช่วงฤดู September Equinox ไม่มีข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูล และช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 16.00 น. มีค่าประมาณ 1.17×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 06.00 น. เช่นกัน มีค่าประมาณ 0.13×10^{12} e/m³ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox และมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดู June Solstice

ทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} พบว่าในช่วงฤดู March Equinox มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 17.00 น. มีค่าประมาณ 1.51×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเวลา 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.14×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 16.00 น. มีค่าประมาณ 1.03×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเวลา 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.06×10^{12} e/m³ ในช่วงฤดู September Equinox มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 17.00 น. มีค่าประมาณ 1.25×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเวลา 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.08×10^{12} e/m³ และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลา 17.00 น. มีค่าประมาณ 1.12×10^{12} e/m³ และค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเวลา 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.11×10^{12} e/m³ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox และมีค่าต่ำสุดในช่วงฤดู June Solstice เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs}



รูปที่ 4.38 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล



รูปที่ 4.39 เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีโกโตต้าง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายฤดูกาล

เมื่อนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ดังรูปที่ 4.39 พบว่าในช่วงฤดู March Equinox ในช่วงเวลากลางวันมีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ส่วนใหญ่มากกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -29.31% ถึง 41.5% ในช่วงฤดู June Solstice มีค่าพารามิเตอร์

NmF2_{IRI} ส่วนใหญ่น้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} โดยมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -50.78% ถึง 36.32% ในช่วงฤดู September Equinox ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้เนื่องจากไม่มีค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล และในช่วงฤดู December Solstice มีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} น้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -45.16% ถึง 28.33%

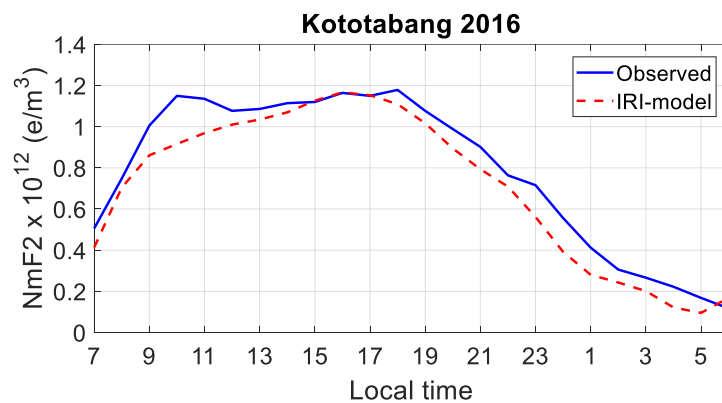
ตารางที่ 4.11 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ NmF2 $\times 10^{12}$ e/m ³ ของสถานีโกโตตาบัง								
ปี พ.ศ.	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	1.045	0.867	0.612	0.616	0.866	0.908	0.708	0.740
2554	1.295	1.121	0.905	0.969	1.441	1.360	1.077	1.088
2555	1.441	1.661	1.191	1.142	1.326	1.387	0.923	1.086
2556	1.495	1.584	1.438	1.219	1.250	1.532	N/A	1.244
2557	N/A	1.811	N/A	1.391	N/A	1.582	1.193	1.205
2558	1.595	1.656	1.188	1.113	1.105	1.237	0.891	0.831
2559	1.156	1.143	0.701	0.681	N/A	0.892	N/A	0.635
2560	N/A	0.857	N/A	0.552	N/A	0.793	N/A	0.577
2561	N/A	0.781	N/A	0.475	N/A	0.690	N/A	0.524

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2553 (Low solar activity) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.612×10^{12} e/m³ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2558 (High solar activity) มีค่าประมาณ 1.595×10^{12} e/m³ ซึ่งมีปีที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้บางส่วน คือปี พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2559, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วงฤดู June Solstice ในปี พ.ศ. 2561 (Low solar activity) ซึ่งมีค่าประมาณ 0.475×10^{12} e/m³ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงฤดู March Equinox ในปี พ.ศ. 2557 (High solar activity) มีค่าประมาณ 1.811×10^{12} e/m³

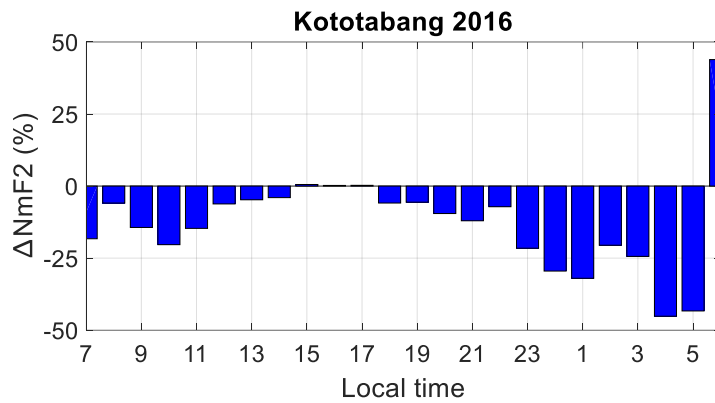
4.2.3.3 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 แบบรายปี

ผลการเปลี่ยนแปลงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้งแบบ NmF2_{Obs} และ NmF2_{IRI} ที่สถานีโกโตตาบัง แบบรายปี พบว่ามีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน คือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันหรือช่วงเวลาประมาณ 06.00-18.00 น. และมีค่าลดลงในช่วงเวลากลางคืนหรือในช่วงเวลาประมาณ 19.00-05.00 น. โดยที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 17.00-18.00 น. มีค่าประมาณ 1.18×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 06.00 น. มีค่าประมาณ 0.12×10^{12} e/m³ ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 16.00 น. มีค่าประมาณ 1.17×10^{12} e/m³ และมีค่าต่ำสุดในช่วงเวลา 05.00 น. มีค่าประมาณ 0.09×10^{12} e/m³ ดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

เมื่อนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ในปี พ.ศ. 2559 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ที่ได้จากการเก็บข้อมูล โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์แตกต่างกันอยู่ระหว่าง -45.16% ถึง 43.89% ดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 เปอร์เซนต์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบระหว่างค่า NmF2_{Obs} กับ NmF2_{IRI} ของสถานีโกโตตาบัง ในปี พ.ศ.2559 แบบรายปี

ตารางที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยรายปีของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ NmF2x10 ¹² e/m ³ ของสถานีโกโตตาบัง								
ปี พ.ศ.	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)		เวลากลางวัน (07.00-17.00)		เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)		เวลากลางคืน (20.00-04.00)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2553	0.094	0.109	0.883	0.933	0.917	0.959	0.256	0.314
2554	0.129	0.183	1.222	1.253	1.377	1.250	0.639	0.605
2555	0.165	0.255	1.300	1.363	1.422	1.526	0.813	0.841
2556	0.172	0.255	1.341	1.434	1.567	1.568	0.829	0.920
2557	N/A	0.312	N/A	1.545	N/A	1.664	N/A	1.060
2558	0.210	0.234	1.225	1.295	1.344	1.410	0.786	0.751
2559	0.130	0.130	1.058	0.983	1.081	1.099	0.447	0.393
2560	N/A	0.087	N/A	0.858	N/A	0.898	N/A	0.238
2561	N/A	0.069	N/A	0.777	N/A	0.792	N/A	0.183

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} จะมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2553 (Low solar activity) ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นประมาณ 05.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ 0.094x10¹² e/m³ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2556 (High solar activity) ในช่วง

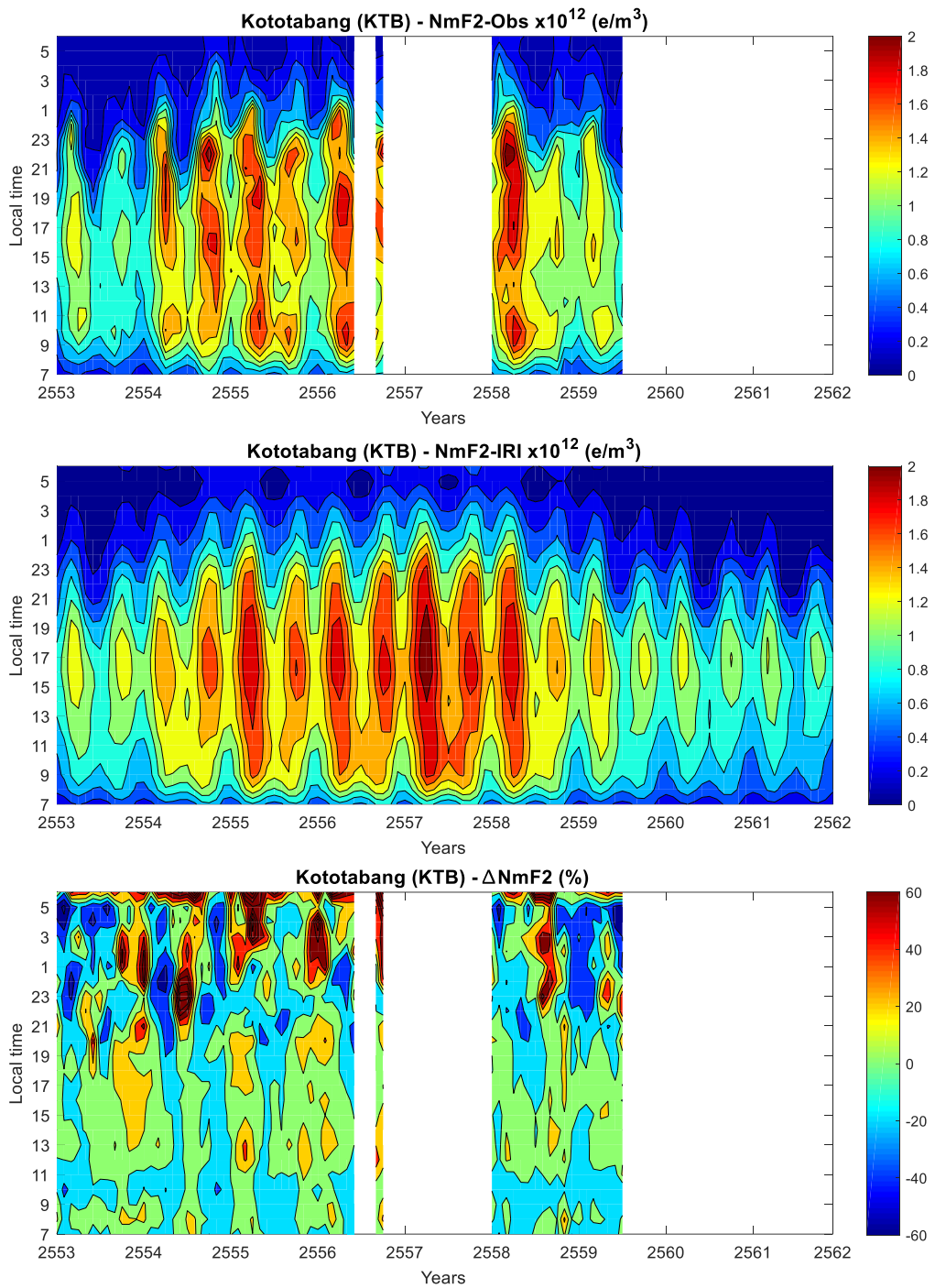
เวลาพระอาทิตย์ตกประมาณ 18.00-19.00 น. มีค่าประมาณ $1.567 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ซึ่งมีข้อมูลบางปีที่สามารถเก็บข้อมูลได้ คือปี พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561 ในขณะที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2561 (Low solar activity) ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นประมาณ 05.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ $0.069 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และมีค่าสูงที่สุดอยู่ในปี พ.ศ. 2557 ในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินประมาณ 18.00-19.00 น. มีค่าประมาณ $1.664 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ตามลำดับ

4.2.3.4 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 จนถึงปี พ.ศ. 2561 แบบ Contour plot

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) ของชั้น F2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมกับแบบจำลอง IRI-2016 ของสถานีโกโตตบั้ง โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 แสดงดังรูปที่ 4.42

เมื่อทำการพิจารณาค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) พบว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} มีลักษณะการเปลี่ยนแปลง คือเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นไปจนถึงช่วงเวลากลางคืนในช่วงเวลาประมาณ 08.00-01.00 น. โดยมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $1.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $2.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ โดยจะมีค่าสูงสุดประมาณ $2.016 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2556 เวลาประมาณ 21.00-23.00 น. และหลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 03.00-06.00 น. ซึ่งมีค่าประมาณ $0.07 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2553 แต่ก็มีข้อมูลหลายปีไม่สามารถเก็บค่าได้ คือปี พ.ศ. 2556, พ.ศ. 2557, พ.ศ. 2559, พ.ศ. 2560 และ พ.ศ. 2561

และเมื่อทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) พบว่าในแต่ละปีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} จะมีลักษณะแตกต่างกันระหว่างปีที่เป็น High solar activity ซึ่งเป็นปีระหว่าง พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2558 ซึ่งปีที่เป็น High solar activity จะมีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} อยู่ในช่วงประมาณ $1.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $2.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลาประมาณ 08.00-23.00 น. เช่นเดียวกับสถานีเชียงใหม่ และปีที่เป็น Low solar activity ซึ่งเป็นปีระหว่าง พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ. 2554 และอีกช่วงคือปี พ.ศ. 2559 ถึง พ.ศ. 2561 ซึ่งจะมีค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} อยู่ในช่วงประมาณ $1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลาประมาณ 11.00-20.00 น. ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าปีที่เป็น High solar activity อย่างเห็นได้ชัด โดยที่ค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่มีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2557 ช่วงเวลาประมาณ 15.00-16.00 น. โดยมีค่าประมาณ $2.132 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} ที่มีค่าต่ำที่สุดอยู่ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2561 มีค่าประมาณ $0.026 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในช่วงเวลา 04.00-05.00 น.

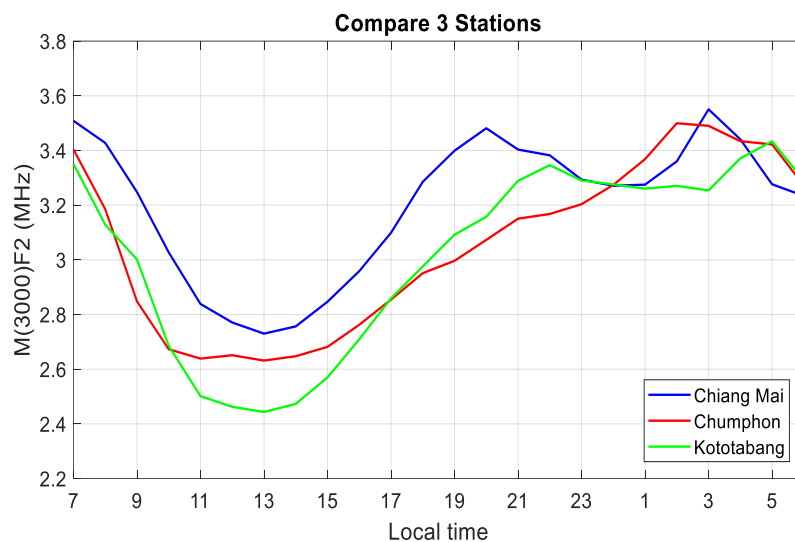


รูปที่ 4.42 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูล (รูปบน) ค่า NmF2_{IRI} ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2561

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ NmF2_{Obs} และค่าพารามิเตอร์ NmF2_{IRI} มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่เก็บได้กับค่าจากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปล่าง) พบว่าในช่วงเวลากลางวัน มีค่าเปอร์เซ็นต์ที่มีความแตกต่างกันส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง -15% ถึง 5% ทำให้ค่า NmF2_{Obs} มีค่าใกล้เคียงหรือมีค่ามากกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่า NmF2_{IRI} และในช่วงเวลากลางคืนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง -60 ถึง -20% และบางช่วงเวลามีค่าความแตกต่างมากกว่า 60% โดยที่ค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนต่ำที่สุดประมาณ -65.8% อยู่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนสูงที่สุดมีค่ามากกว่า 60% อยู่ในช่วงเดือนเมษายน พ.ศ. 2555 ตามลำดับ

4.3 สรุป

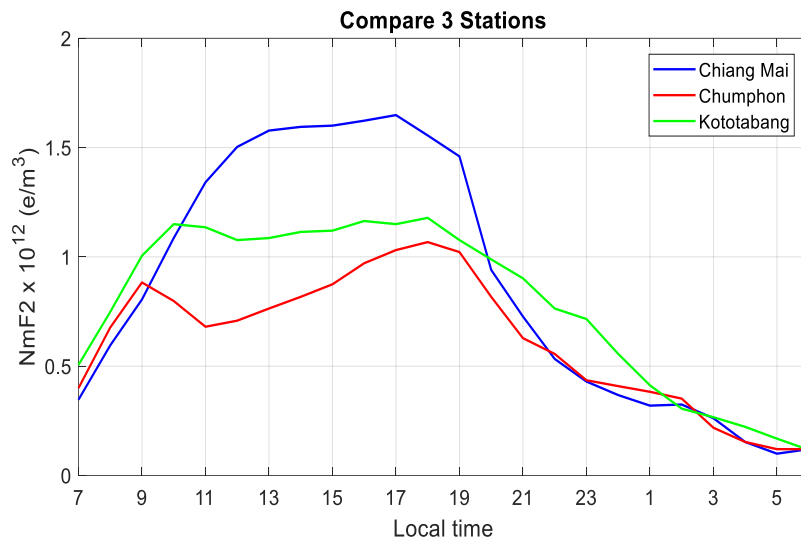
ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตร หรือ M(3000)F2 ของทั้ง 3 สถานี คือคือสถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ และสถานีโกโตตาบัง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 เปรียบเทียบ 3 สถานี

พบว่าทั้ง 3 สถานี มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน คือมีค่าลดลงก่อนช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. ไปจนถึงช่วงที่ต่ำที่สุดในช่วงเวลาประมาณ 11.00-13.00 น. โดยที่สถานีโกโตตาบังมีค่าต่ำที่สุด มีค่าประมาณ 2.44-2.53 MHz ต่อมาคือสถานีชุมพร มีค่าประมาณ 2.63-2.76 MHz และสุดท้ายคือสถานีเชียงใหม่ ซึ่งมีค่าประมาณ 2.72-2.84 MHz ซึ่งทั้ง 3 สถานีมีค่าต่ำที่สุดในปี พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มากที่สุด (High solar activity) เมื่อเทียบกับปีอื่น ๆ หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 03.00-04.00 น. โดยที่สถานีเชียงใหม่จะมีค่าสูงที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 3.331-3.518 MHz ต่อมาคือสถานีชุมพร มี

ค่าประมาณ 3.356-3.470 MHz และสุดท้ายคือสถานีโกโตตาบัง ซึ่งมีค่าประมาณ 3.328-3.418 MHz โดยอยู่ในช่วงปี พ.ศ. 2561 เป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์น้อย (Low solar activity) เนื่องจากมีค่าความถี่วิกฤต (f_oF_2) ในชั้นบรรยากาศน้อยที่สุด จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ มีค่ามากที่สุด เพราะค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F_2$ ที่ได้จะมีค่าแปรผกผันกับค่าความถี่วิกฤตในชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 4.44 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 เปรียบเทียบ 3 สถานี

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดของชั้น F2 หรือ NmF2 ของทั้ง 3 สถานี ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.44 พบว่าที่สถานีเชียงใหม่และสถานีโกโตตาบัง จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวัน จนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาก่อนเพราะอาทิตย์ตกดินหรือช่วงเวลาประมาณ 17.00-18.00 น. ก่อนที่จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ต่ำที่สุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นเวลาประมาณ 05.00-06.00 น. โดยที่สถานีเชียงใหม่มีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ $1.62 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสถานีโกโตตาบังมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ $1.21 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ซึ่งทั้ง 2 สถานีมีค่าสูงสุดในช่วงปี พ.ศ. 2557 (High solar activity) ซึ่งเป็นปีที่มีค่าความถี่วิกฤต (f_oF_2) ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด จึงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ NmF2 มีค่ามากที่สุดเพราะค่าพารามิเตอร์ NmF2 มีค่าแปรผันตามกับค่าความถี่วิกฤต ในขณะที่สถานีชุมพรจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลง คือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณ 05.00-09.00 น. และมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 10.00-13.00 น. เนื่องจากเกิดการพัดพาของอิเล็กตรอนไปในทิศทางอื่น ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในบริเวณสถานีที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศของบริเวณดังกล่าวมีจำนวนลดลง จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) มีค่าลดลงด้วย จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 17.00-19.00 น. และหลังจากช่วงพระอาทิตย์ตกดินไปแล้วจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงช่วงเวลาประมาณ 04.00-05.00 น. โดยที่สถานีชุมพรมีค่าสูงที่สุดอยู่มีค่าประมาณ

$1.05 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้ง 3 สถานี พบว่า สถานีเชียงใหม่มีค่าพารามิเตอร์ NmF2 มากที่สุดเนื่องจากอยู่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 15 องศา ต่อมาคือสถานีโกโตตาบังที่สถานีตั้งอยู่ใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา และสถานีที่มีค่าพารามิเตอร์ NmF2 ต่ำที่สุด คือสถานีชุมพรซึ่งเป็นสถานีที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กนั่นเอง

บทที่ 5

การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (NmF2) เทียบกับการเกิดสุริยุปราคา

ในบทนี้กล่าวถึงการศึกษาผลกระทบของสุริยุปราคาในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เพื่อสังเกตความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (NmF2) ในวันที่เกิดสุริยุปราคาจำนวนทั้งหมด 4 ครั้ง [23]-[26] โดยทำการศึกษาผลกระทบของสุริยุปราคาในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีทั้งหมด 3 สถานี คือ สถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย

5.1 ข้อมูลและวิธีการวิเคราะห์

ข้อมูลที่ใช้การศึกษาในบทนี้จะใช้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (NmF2) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เวลาต่าง ๆ กัน ในช่วงเวลาทุก ๆ 15 นาที ในวันที่เกิดสุริยุปราคาจำนวน 4 ครั้ง คือวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550, วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552, วันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553 และวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559 และเพิ่มวันควบคุม (วันก่อนและหลังเกิดสุริยุปราคา) จำนวน 5 วัน โดยทำการศึกษาพื้นที่ทั้งหมด 3 สถานีซึ่งตั้งอยู่บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือ สถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย

ตารางที่ 5.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดของวันที่เกิดสุริยุปราคาของแต่ละสถานี

ที่ตั้งสถานี	วันที่เกิดสุริยุปราคา (เปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุด %)											
	9 มีนาคม 2559			15 มกราคม 2553			22 กรกฎาคม 2552			19 มีนาคม 2550		
	เริ่มเกิด	สิ้นสุด	บดบัง	เริ่มเกิด	สิ้นสุด	บดบัง	เริ่มเกิด	สิ้นสุด	บดบัง	เริ่มเกิด	สิ้นสุด	บดบัง
เชียงใหม่	06:49 น.	08:30 น.	27.1%	14:00 น.	17:03 น.	81.6%	07:02 น.	09:12 น.	69.9%	07:45 น.	09:15 น.	28%
ชุมพร	06:35 น.	08:31 น.	47.9%	13:57 น.	16:55 น.	64.1%	07:08 น.	09:15 น.	46.3%	07:50 น.	08:43 น.	10%
โกโตตาบัง	06:25 น.	08:25 น.	100%	14:02 น.	16:46 น.	48.2%	07:20 น.	08:58 น.	27.3%	None	None	0%

โดยที่การเกิดสุริยุปราคาในแต่ละครั้งจะเกิดในช่วงเวลาและบริเวณที่มีแถบเงามืดของดวงจันทร์พาดผ่านที่แตกต่างกัน ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 2 ทั้งนี้การเกิดสุริยุปราคาทั้งหมด 4 ครั้ง ที่ได้นำมาศึกษาเพื่อสังเกตค่าความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (NmF2) มีช่วงเวลาเริ่มเกิด เวลาสิ้นสุดและเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดที่เกิดในแต่ละครั้ง ดังตารางที่ 5.1

การเก็บข้อมูลใช้เครื่องส่งและเครื่องรับคลื่นในย่าน HF ผ่านสายอากาศ โดยเครื่องรับจะทำการเก็บข้อมูลเป็นภาพไอโอโนแกรมไว้ในคอมพิวเตอร์ เพื่อนำภาพไอโอโนแกรมนี้มาทำการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 (foF2) จากนั้นคำนวณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) จากค่าความถี่วิกฤตโดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการ (5.1)

$$NmF2 = (foF2)^2 / 80.5 \quad (5.1)$$

นอกจากนี้ยังกำหนดขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) และขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ซึ่งนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ โดยหาได้จาก สมการ (5.2) และ (5.3) [18]

$$UB = X + 2S \quad (5.2)$$

$$LB = X - 2S \quad (5.3)$$

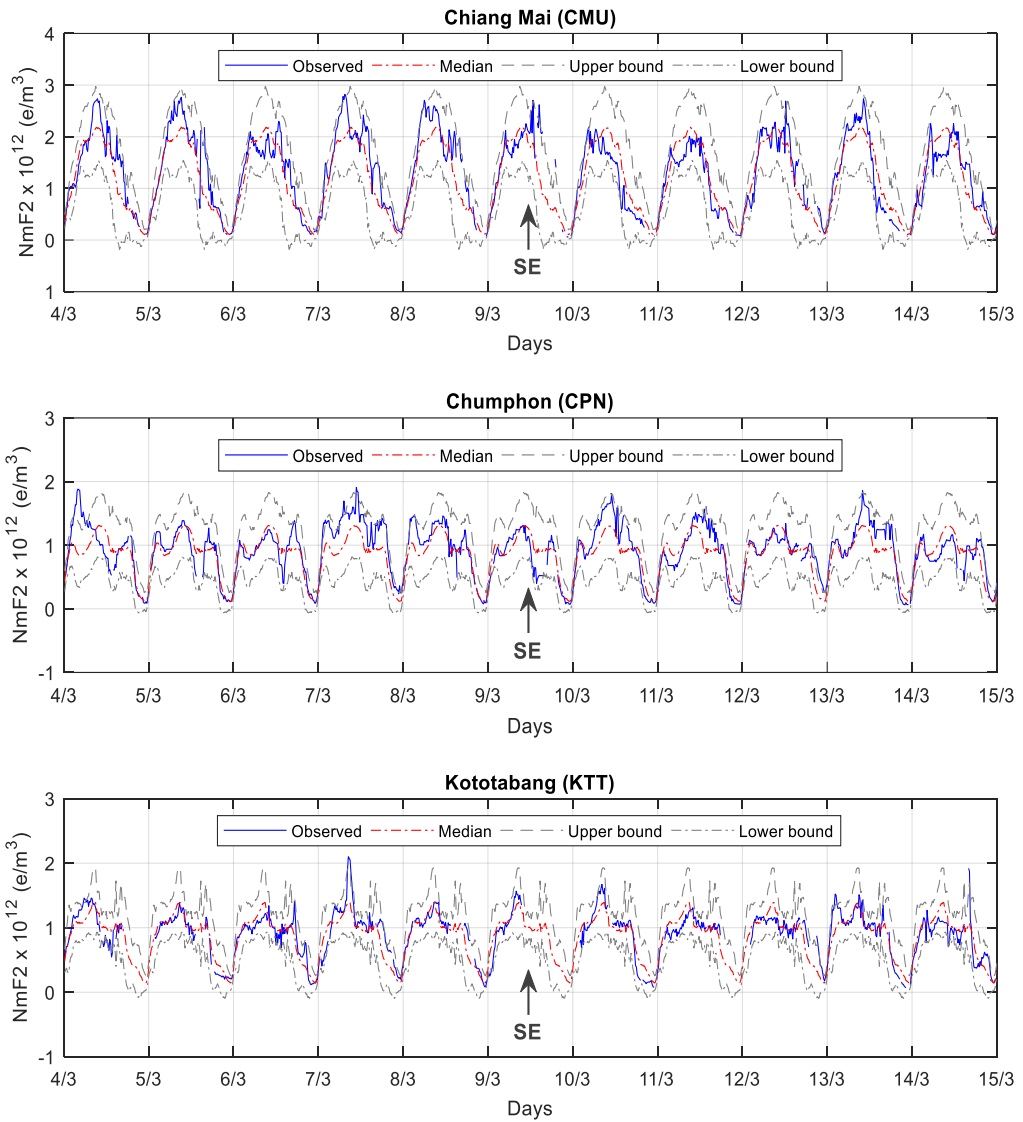
โดยที่ X คือ ค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 (Median), S คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, UB คือขอบเขตอ้างอิงด้านบนและ LB คือขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง

5.2 ผลลัพธ์และการอภิปราย

จากผลการวิเคราะห์ทำการศึกษการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) ทั้งหมด 4 ครั้งที่เกิดสุริยุปราคาและสามารถมองเห็นได้ในประเทศไทย คือวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550, วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552, วันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553 และวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559 เหตุที่เลือกช่วงวันเวลาดังกล่าวเนื่องจากเครื่องส่งและเครื่องรับได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเริ่มจากปี พ.ศ. 2547 ทั้ง 3 สถานีคือสถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย โดยที่ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นรูปภาพที่เรียงจากช่วงวันที่เกิดสุริยุปราคาจากช่วงเวลาปัจจุบันไปยังอดีตรวมทั้งหมด 4 ภาพ ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

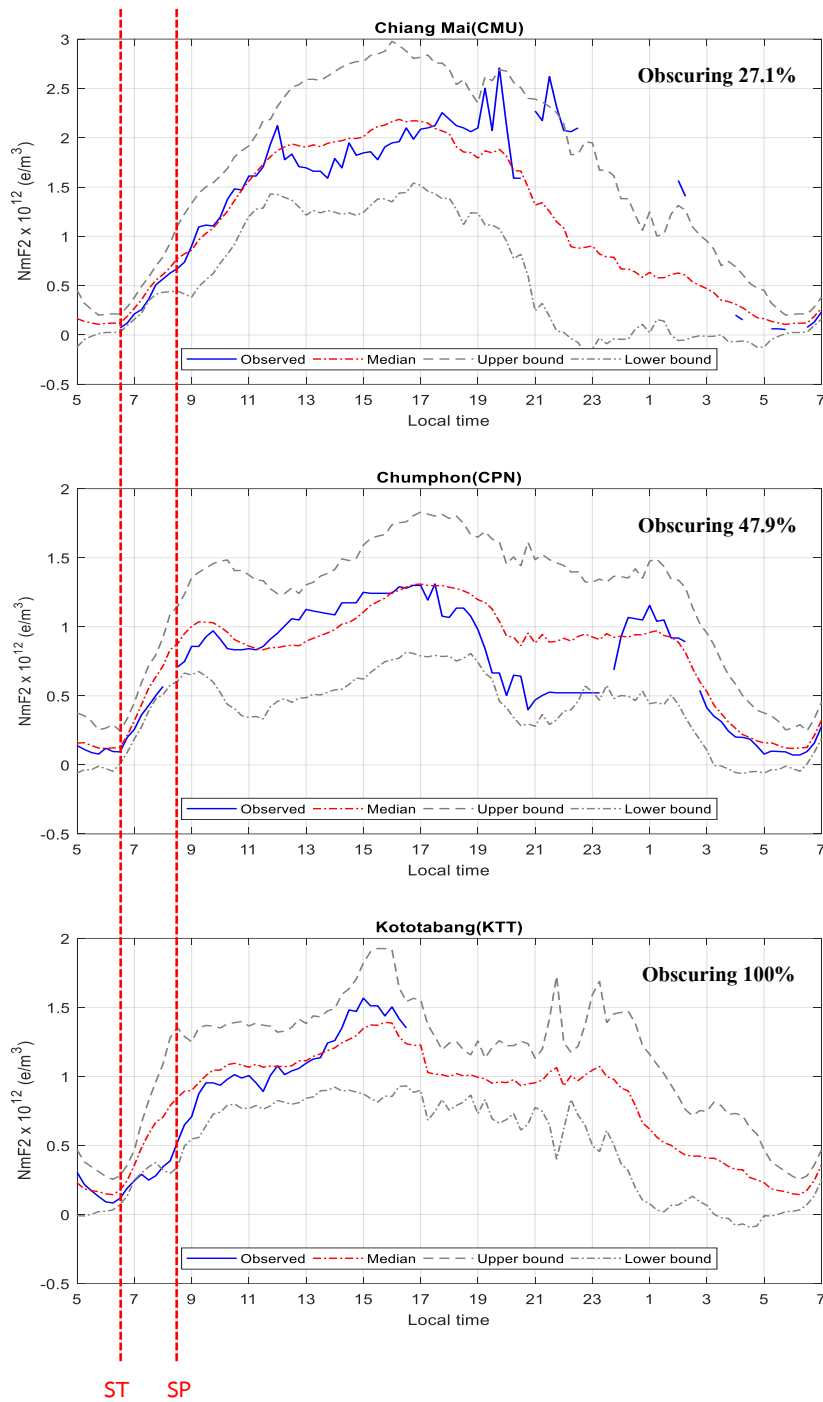
5.2.1 สุริยุปราคาวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559

แสดงผลค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) แบ่งเป็น 3 สถานี โดยเรียงจากสถานีเชียงใหม่ (รูปด้านบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปด้านล่าง) และค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) จะแสดงเป็นเส้นทึบสีน้ำเงินของวันที่เกิดสุริยุปราคา, วันก่อนและหลังเกิดสุริยุปราคาจำนวนอย่างละ 5 วัน, ค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 (Median) แสดงเป็นเส้นประจุดสีแดง, ค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) แสดงเป็นเส้นประจุดสีเทาและค่าขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) แสดงเป็นเส้นประสีเทา

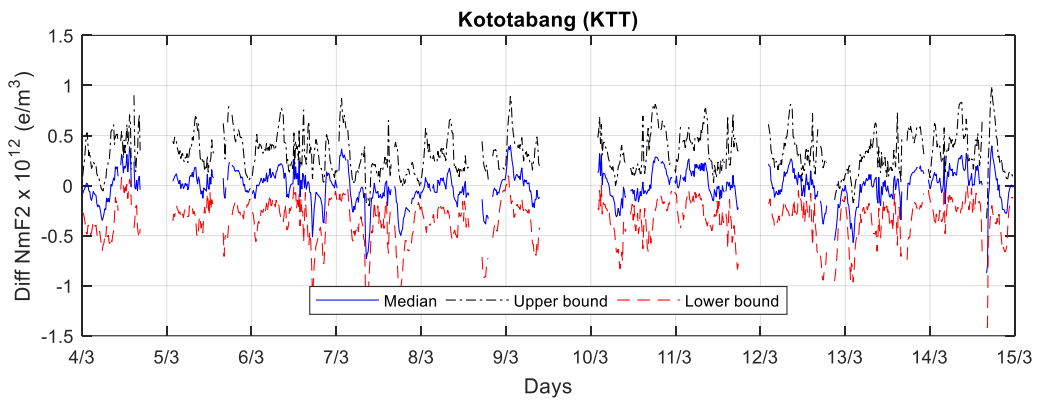
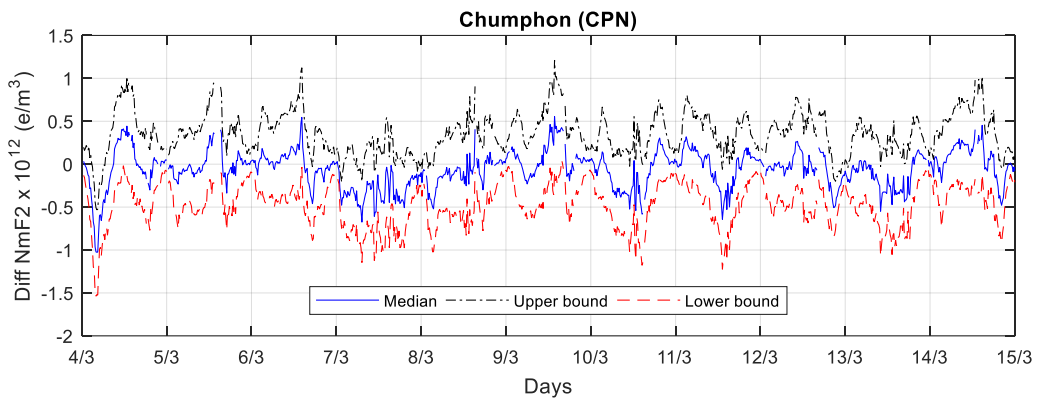
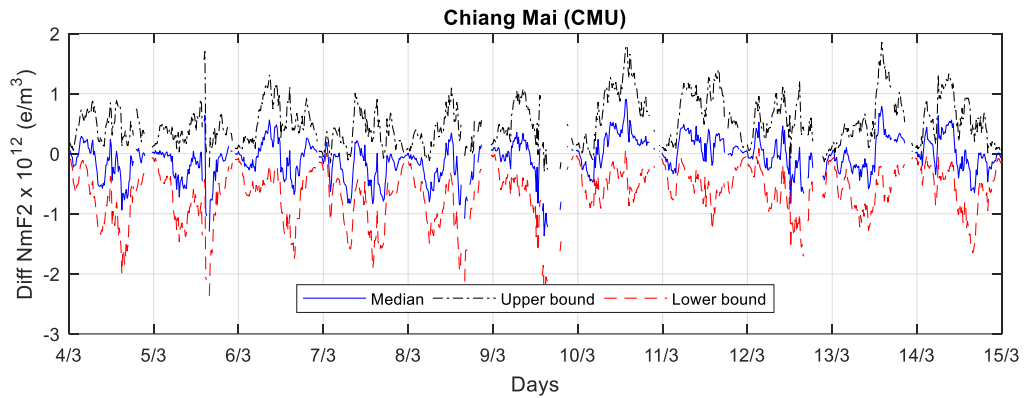


รูปที่ 5.1 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 4 มีนาคม ถึง 14 มีนาคม 2559 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 9 มีนาคม 2559

จากรูปที่ 5.1 เห็นได้ว่าทั้ง 3 สถานีมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) ของวันที่ก่อนเกิดสุริยุปราคาสูงกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนแต่จะไม่สูงกว่าค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบน โดยเฉพาะวันที่ 7 มีนาคม 2559 จะมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 สูงสุด โดยที่สถานีเชียงใหม่มีค่า NmF2 ประมาณ $2.8 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ สถานีชุมพรมีค่า NmF2 ประมาณ $1.9 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสถานีโกโตตาบังมีค่า NmF2 ประมาณ $2.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ เนื่องจากการเกิดพายุแม่เหล็กระดับปานกลาง Dst-index ($-50 \text{ nT} > \text{Dst} < -100 \text{ nT}$) ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 5.2 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 9 มีนาคม 2559 ที่สถานี เชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง)



รูปที่ 5.3 ความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และ สถานีโกโตต้าง (รูปล่าง)

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลเฉพาะวันที่ 9 มีนาคม 2559 การเกิดสุริยุปราคาเริ่มเวลา 06:38 น. และสิ้นสุดที่ 8:32 น. ระยะเวลารวม 1 ชั่วโมง 54 นาที และพื้นที่ซึ่งสามารถมองเห็นสุริยุปราคาเต็มดวง อยู่ภายในแถบ ๆ ผ่านด้านตะวันออกของมหาสมุทรอินเดีย อินโดนีเซีย และตอนกลางของมหาสมุทรแปซิฟิก บริเวณที่เห็นสุริยุปราคาบางส่วน ได้แก่ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เอเชียตะวันออก ส่วนใหญ่ของ

ออสเตรเลีย และส่วนใหญ่ของมหาสมุทรแปซิฟิก ประเทศไทยอยู่นอกแนวดังกล่าวแต่อยู่ภายในเขตที่เงามัวพาดผ่าน โดยมีเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดที่สถานีเชียงใหม่ 27.1% สถานีชุมพร 47.9% และสถานีโกโตตาบัง 100% ตามตารางที่ 5.1 จากผลการวิเคราะห์จึงทำให้สถานีโกโตตาบังมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด NmF2 ในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคาแตกต่างจากค่าเฉลี่ยรายเดือนมากที่สุดเนื่องจากมีการบดบังของสุริยุปราคาสูงสุดถึงแม้จะมีข้อมูลหายไปในช่วงเวลา แสดงดังรูปที่ 5.2

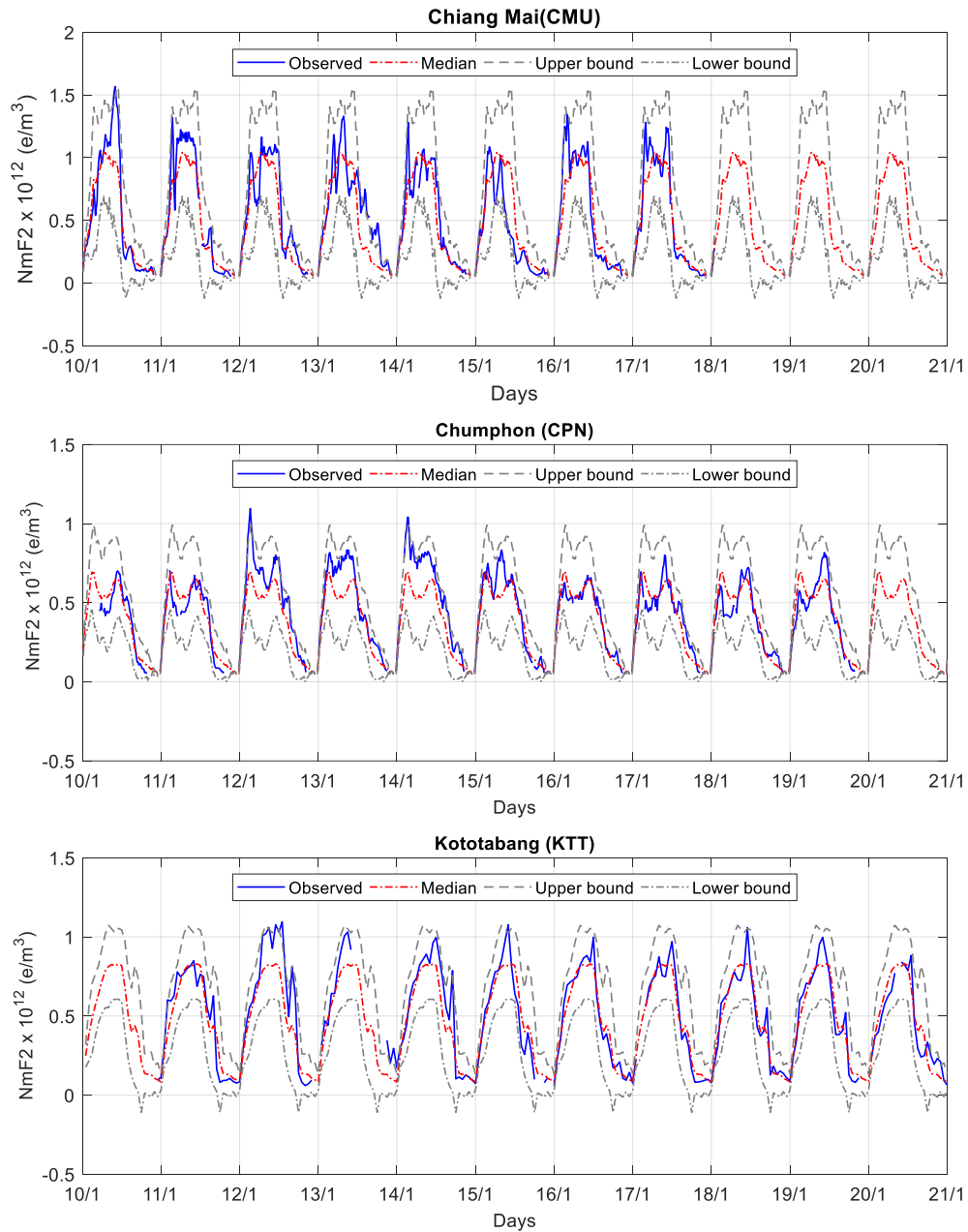
แสดงค่าความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือน (Median) ขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) และขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) จากรูปที่ 5.3 โดยที่เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงค่าเฉลี่ยรายเดือน, เส้นประจุดสีดำแสดงค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบนและเส้นประสีแดงแสดงค่าขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง สำหรับสถานีเชียงใหม่ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนแตกต่างกันระหว่าง $\pm 1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ในขณะที่ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-2.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $-0.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ สำหรับสถานีชุมพรค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างมีค่าแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $-0.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสถานีโกโตตาบังค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $0.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.9 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตล่างมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ตามลำดับ

5.2.2 สุริยุปราคาวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553

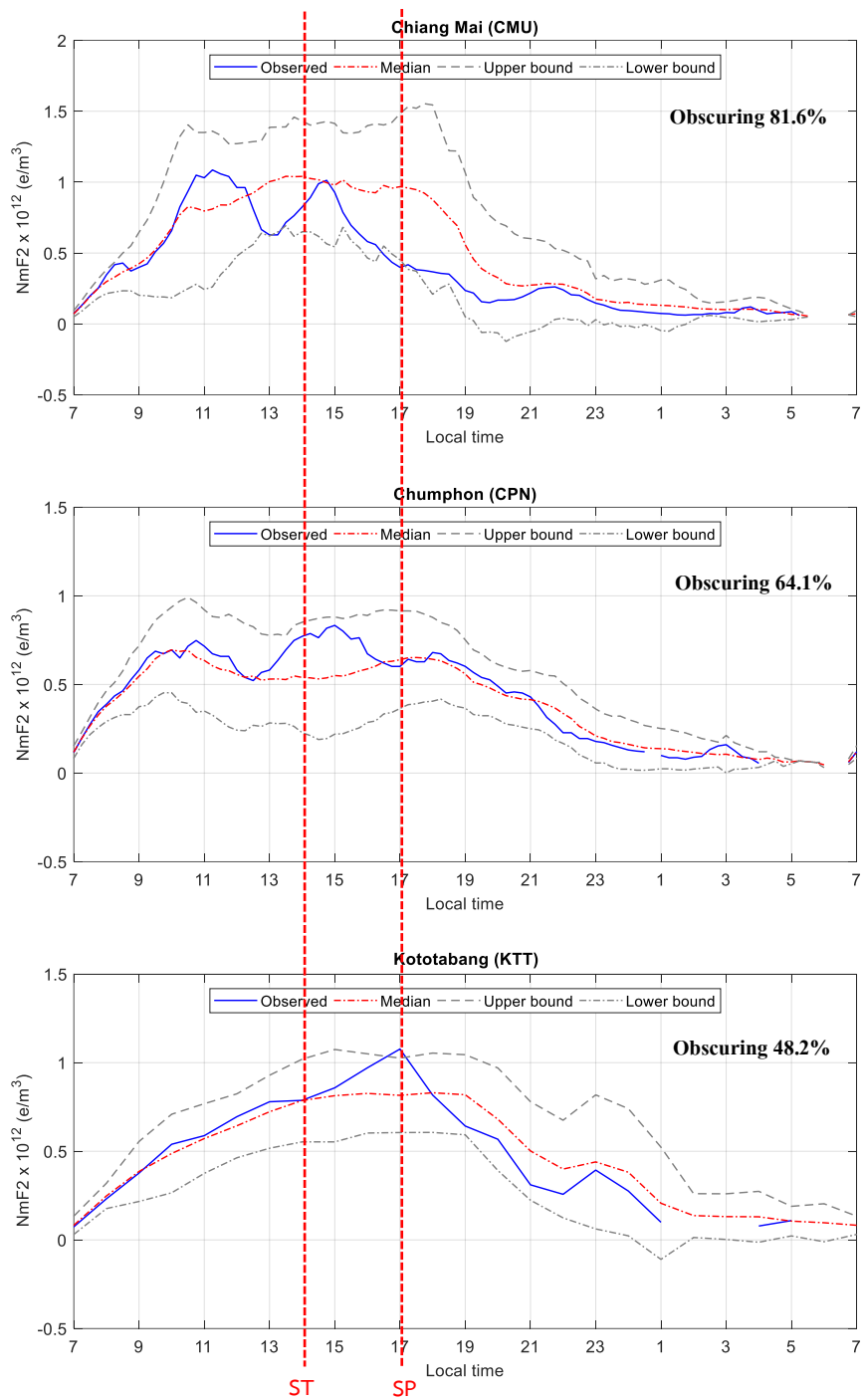
ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ดังรูปที่ 5.4 เห็นได้ชัดที่สถานีเชียงใหม่มีค่า NmF2 ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 (Median) และช่วงหลังเกิดสุริยุปราคาวันที่ 18-20 มกราคม 2553 ไม่มีข้อมูล ส่วนสถานีชุมพรมีค่า NmF2 ของวันที่ก่อนเกิดสุริยุปราคาสูงกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือน และมีบางช่วงสูงกว่าค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบน โดยมีค่า NmF2 สูงสุดในวันที่ 12 มกราคม 2553 มีค่าประมาณ $1.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสถานีโกโตตาบังมีค่า NmF2 ส่วนใหญ่สูงกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือน แต่มีค่าไม่เกินค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบน

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของวันที่ 15 มกราคม 2553 ในรูปที่ 5.5 พบว่าในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคา ช่วงเวลาเริ่มเกิดประมาณ 13:57 น. และสิ้นสุดที่ 17:03 น. ระยะเวลารวมประมาณ 3 ชั่วโมง 6 นาที ซึ่งเป็นบริเวณที่เห็นสุริยุปราคาบางส่วนและเงามัวของดวงจันทร์พาดผ่านครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของทวีปเอเชีย แอฟริกา บางส่วนทางตะวันออกของยุโรป มหาสมุทรอินเดีย สำหรับประเทศไทยสามารถเห็นสุริยุปราคาครั้งนี้ได้ทั่วทุกภาคโดยภาคเหนือตอนบนเห็นดวงอาทิตย์แหวกมากกว่าภาคอื่น ๆ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังของแต่ละสถานีคือ สถานีเชียงใหม่ 81.6% สถานีชุมพร 64.1% และสถานีโกโตตาบัง 48.2% จึงมีผลทำให้สถานีเชียงใหม่มีค่า NmF2 มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนของ

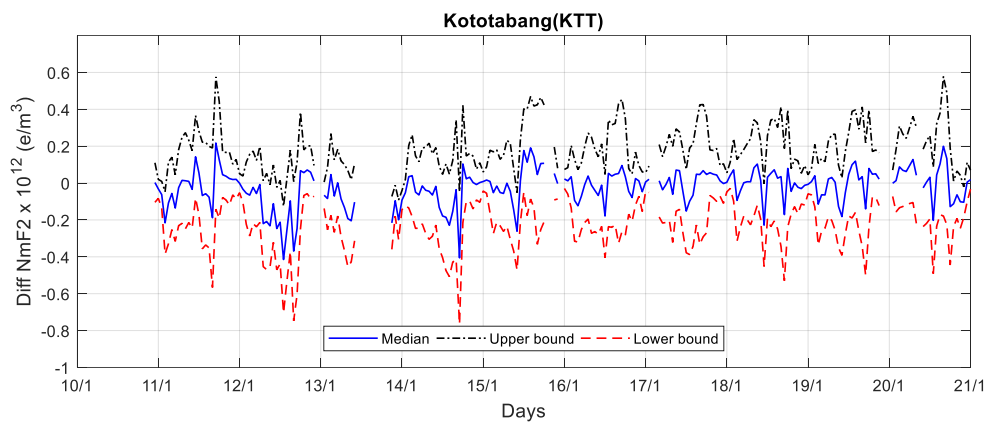
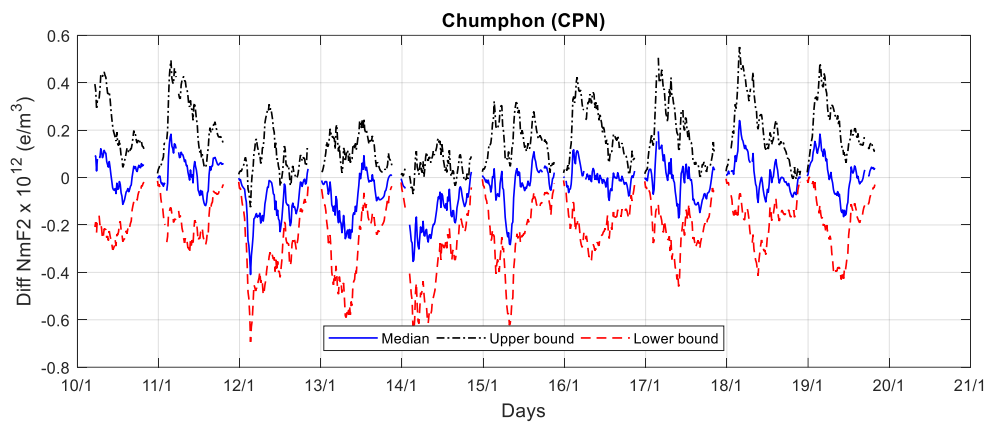
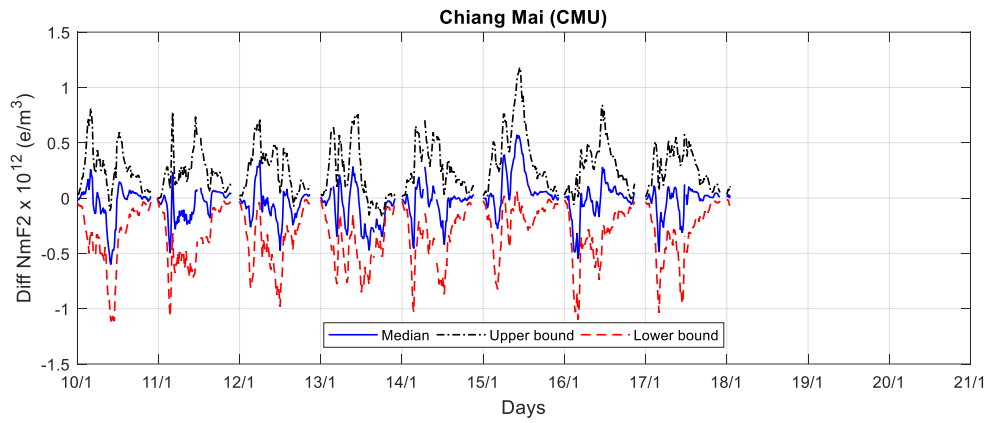
ข้อมูล NmF2 มากที่สุด สถานีชุมพรมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 และที่สถานีโกโตตาบั้งมีค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังน้อยที่สุดมีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 เล็กน้อย



รูปที่ 5.4 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบั้ง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 10 มกราคม ถึง 20 มกราคม 2553 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 15 มกราคม 2553



รูปที่ 5.5 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 15 มกราคม 2553 ที่สถานี เชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตต้าง (รูปล่าง)



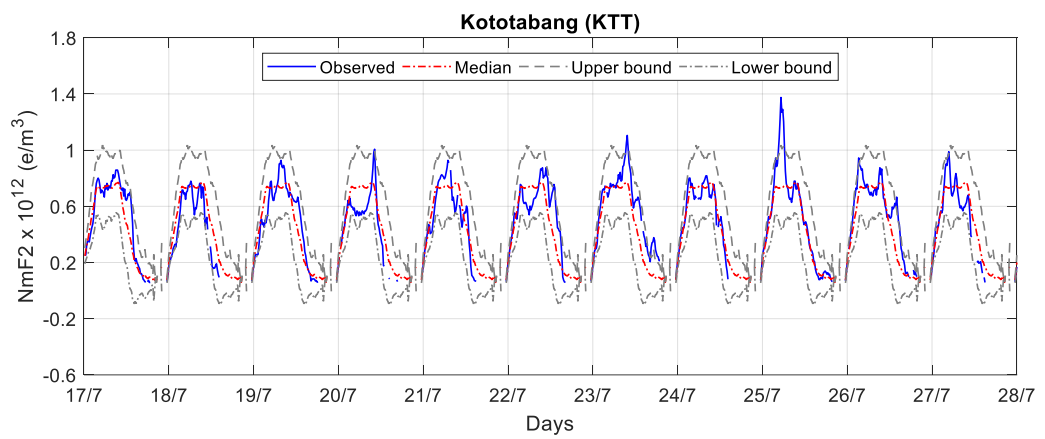
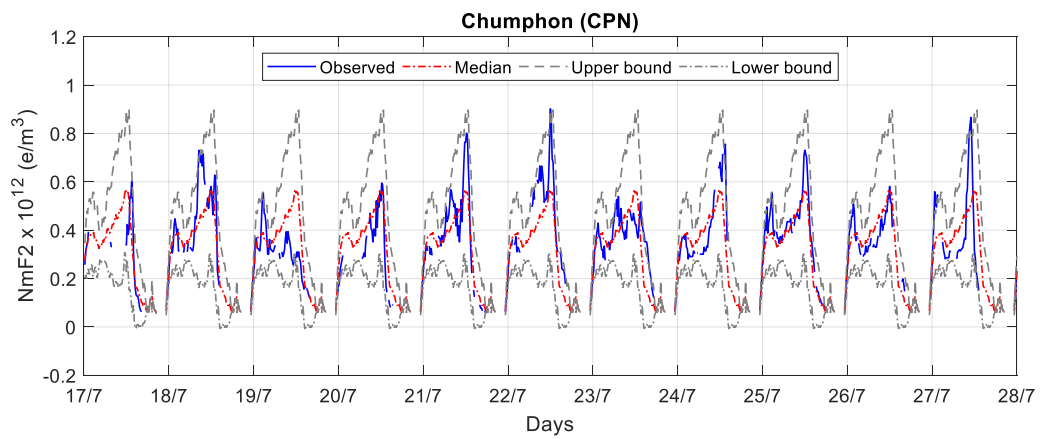
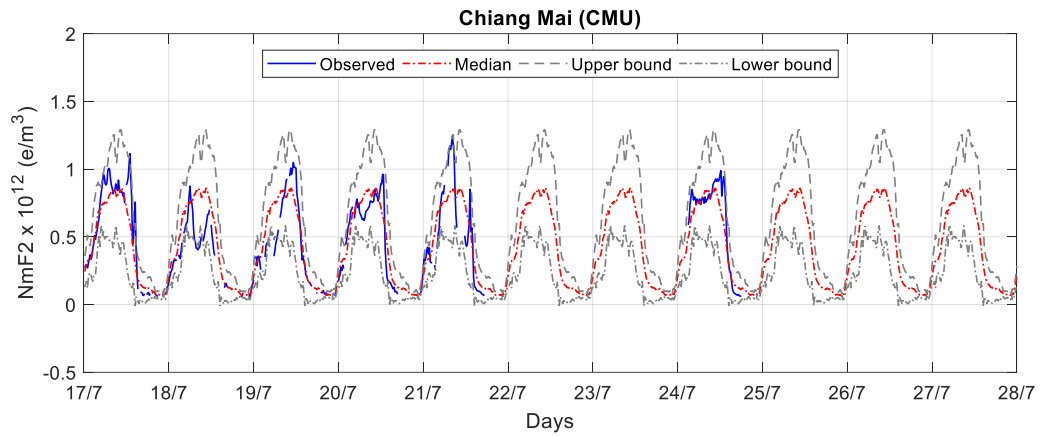
รูปที่ 5.6 ความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และ สถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง)

ค่าความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือน (Median) ขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) และขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ดังรูปที่ 5.6 โดยที่เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงค่าเฉลี่ยรายเดือน, เส้นประจุดสีดำแสดงค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบนและเส้นประสีแดงแสดงค่าขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง

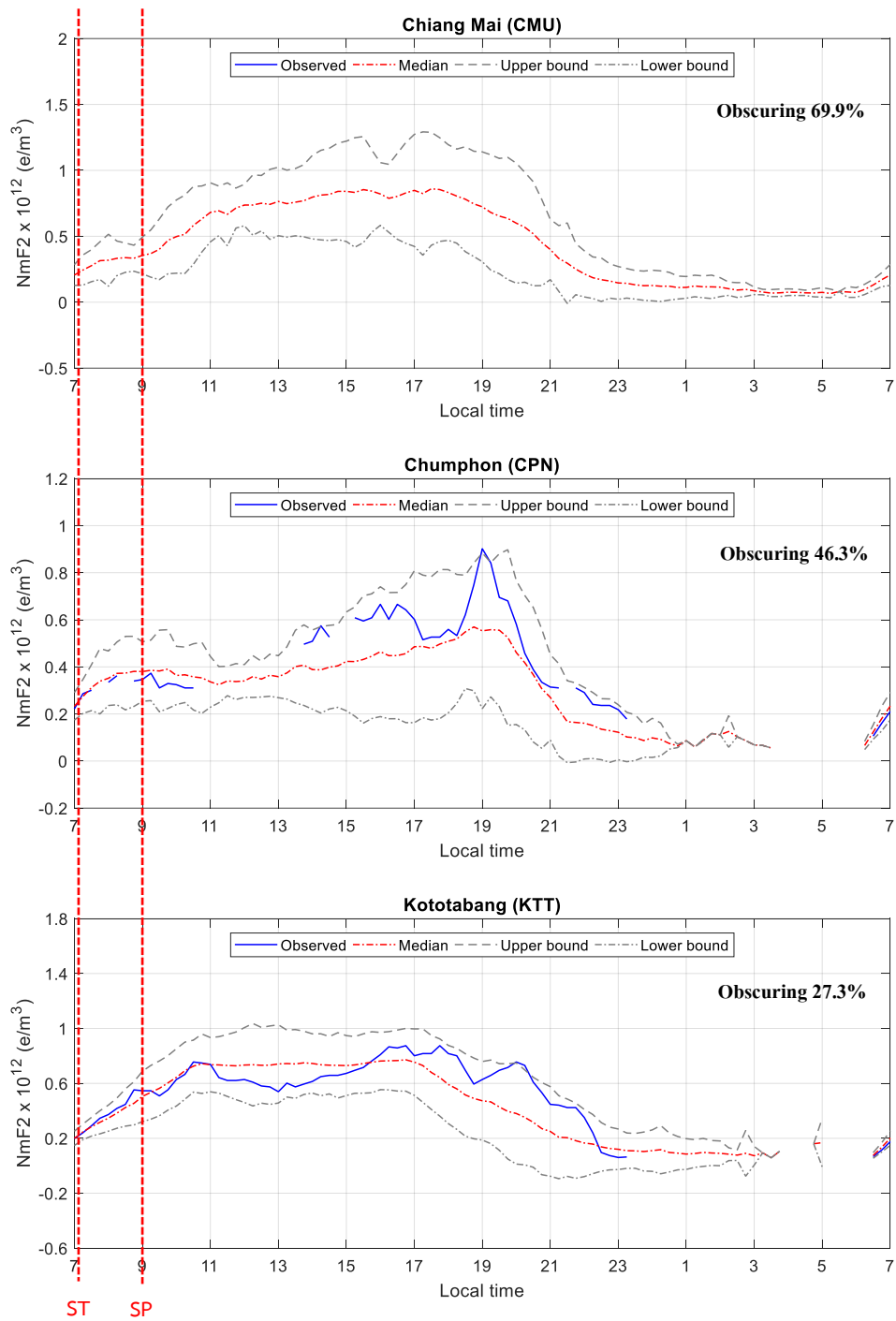
สำหรับสถานีเชียงใหม่ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.45 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.6 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.02 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ สำหรับสถานีชุมพรค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.4 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.22 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.16 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.58 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.7 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $-0.01 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสำหรับสถานีโกโตตบบังค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.41 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $0.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.6 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตล่างมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.78 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $-0.02 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ตามลำดับ

5.2.3 สุริยุปราคาวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552

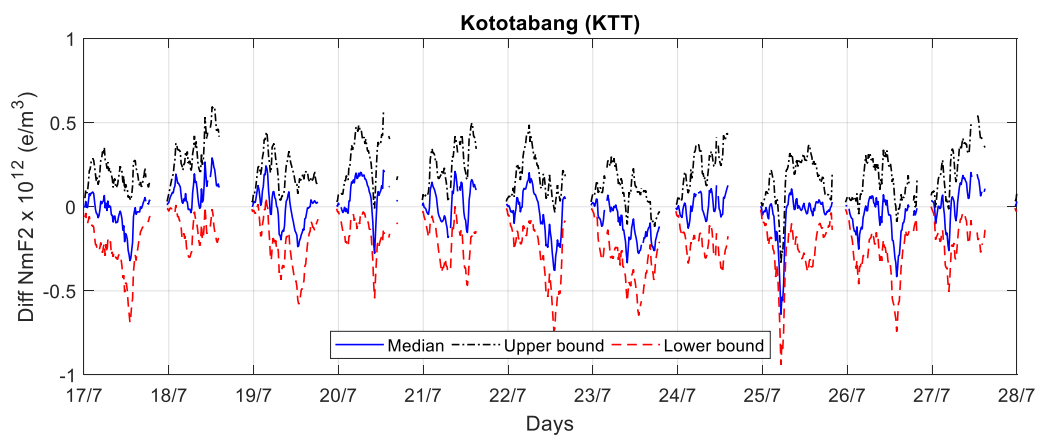
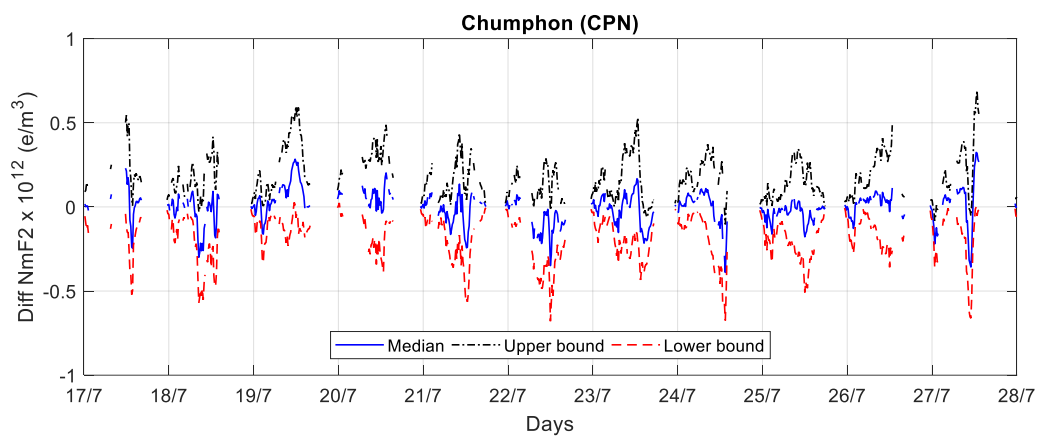
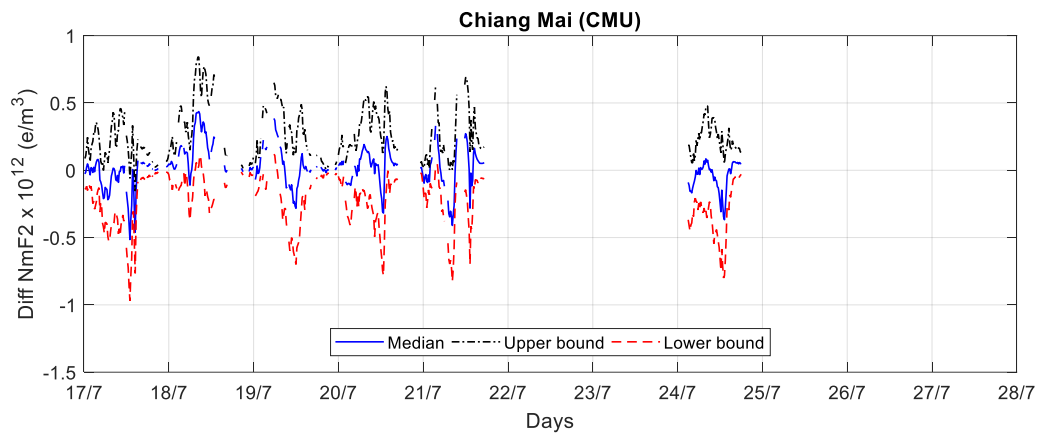
โดยที่สุริยุปราคาครั้งนี้มีเส้นทางสุริยุปราคาเต็มดวงเริ่มต้นที่อินเดีย ผ่านประเทศจีน เกาหลี ๑ ทางใต้ของญี่ปุ่น และหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก เจมมีดของดวงจันทร์เริ่มแตะผิวโลกตรงบริเวณชายฝั่งด้านทิศตะวันตกของประเทศอินเดียเมื่อเวลาประมาณ 07:53 น. ตามเวลาประเทศไทย จากนั้นเคลื่อนไปทางตะวันออกอย่างรวดเร็ว ผ่านพื้นที่บางส่วนของเนปาล บังกลาเทศ ภูฏาน และตอนเหนือสุดของพม่า เข้าสู่ประเทศจีน ผ่านเฉิงตูในมณฑลเสฉวน และเมืองใหญ่อย่างเซี่ยงไฮ้ จากรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าสถานีเชียงใหม่ไม่มีข้อมูลของวันที่เกิดและวันหลังเกิดสุริยุปราคาจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ สถานีชุมพรมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 ส่วนใหญ่สูงกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือน และวันที่เกิดสุริยุปราคามีค่า NmF2 สูงกว่าค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบน โดยมีค่าประมาณ $0.9 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสถานีโกโตตบบังมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือน ยกเว้นวันหลังเกิดสุริยุปราคาวันที่ 25 กรกฎาคม 2552 มีค่า NmF2 สูงสุดประมาณ $1.4 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และยังสูงกว่าค่าขอบเขตอ้างอิงด้านบน เนื่องจากมีการเกิดพายุแม่เหล็กกระดับปานกลาง Dst-index ($-50 \text{ nT} > \text{Dst} < -100 \text{ nT}$) และมีค่าการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กกระดับปานกลาง Kp-index ประมาณ Kp 4 ถึง Kp 6 ในวันที่ 23-25 กรกฎาคม 2552 ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้นบรรยากาศ



รูปที่ 5.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และ สถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 17 กรกฎาคม ถึง 27 กรกฎาคม 2552 และวันที่ เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 22 กรกฎาคม 2552



รูปที่ 5.8 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 22 กรกฎาคม 2552 ที่สถานี เชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตต้าง (รูปล่าง)



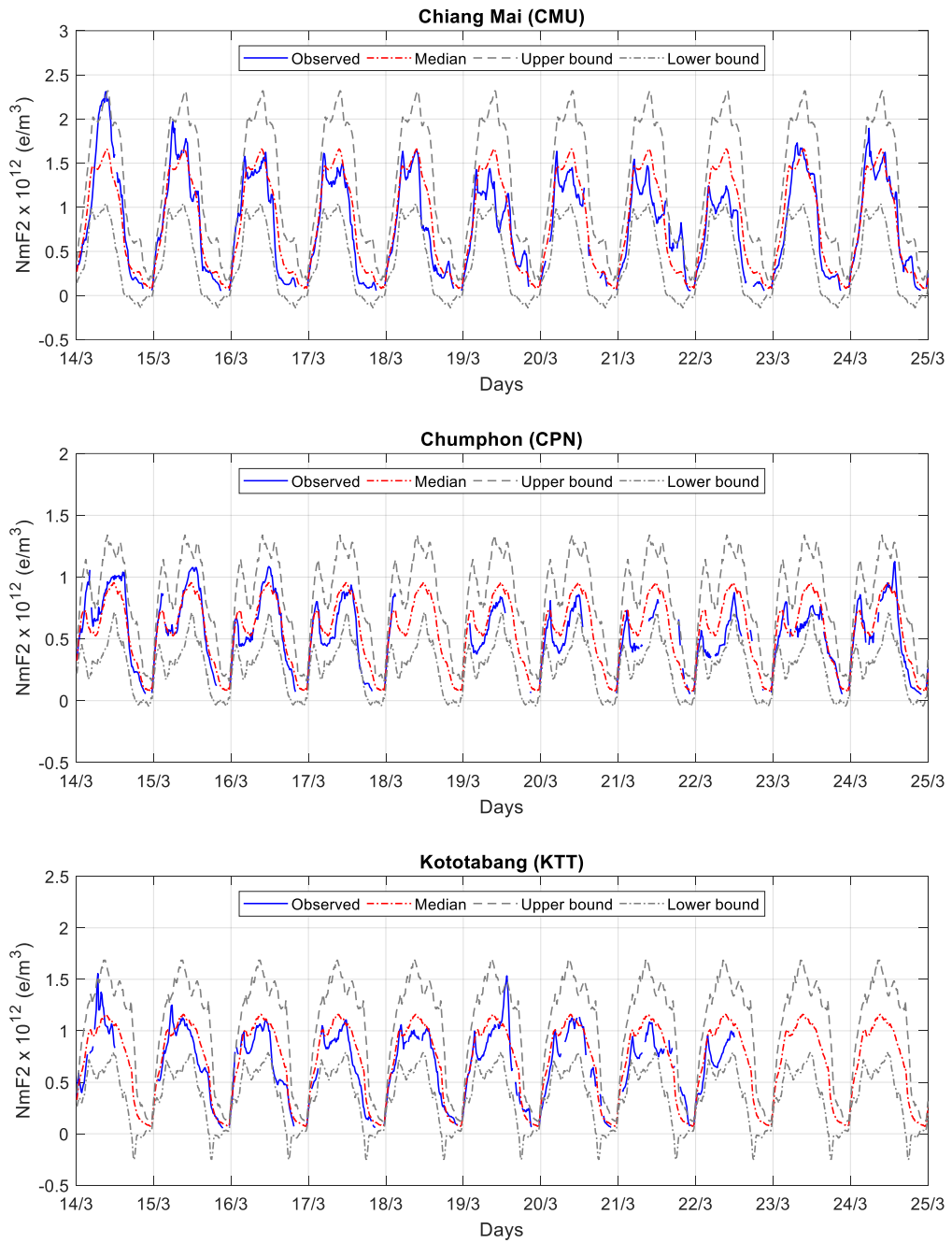
รูปที่ 5.9 ความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และ สถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง)

ประเทศไทยเห็นสุริยุปราคาครั้งนี้เป็นชนิดบางส่วนในเวลาประมาณ 07:00 น. ถึง 09:00 น. ภาคเหนือและตอนบนของภาคอีสานเป็นพื้นที่ที่มีโอกาสเห็นดวงอาทิตย์แหวกเว้ามากที่สุด มีค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังของแต่ละสถานีคือสถานีเชียงใหม่ 69.9% สถานีชุมพร 46.3% และสถานีโกโตตาบัง 27.3% โดยที่สถานีเชียงใหม่มีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 แตกต่างกับค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 มากที่สุด แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลของวันที่เกิดและวันหลังเกิดสุริยุปราคาจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ สถานีชุมพรมีข้อมูลของค่า NmF2 เพียงบางส่วนในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคา จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เช่นกัน และในส่วนของสถานีโกโตตาบังมีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 ในช่วงที่เกิดสุริยุปราคาใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือนของข้อมูล NmF2 เนื่องจากมีค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังของน้อยที่สุด เมื่อเทียบจากทั้ง 3 สถานี ดังรูปที่ 5.8

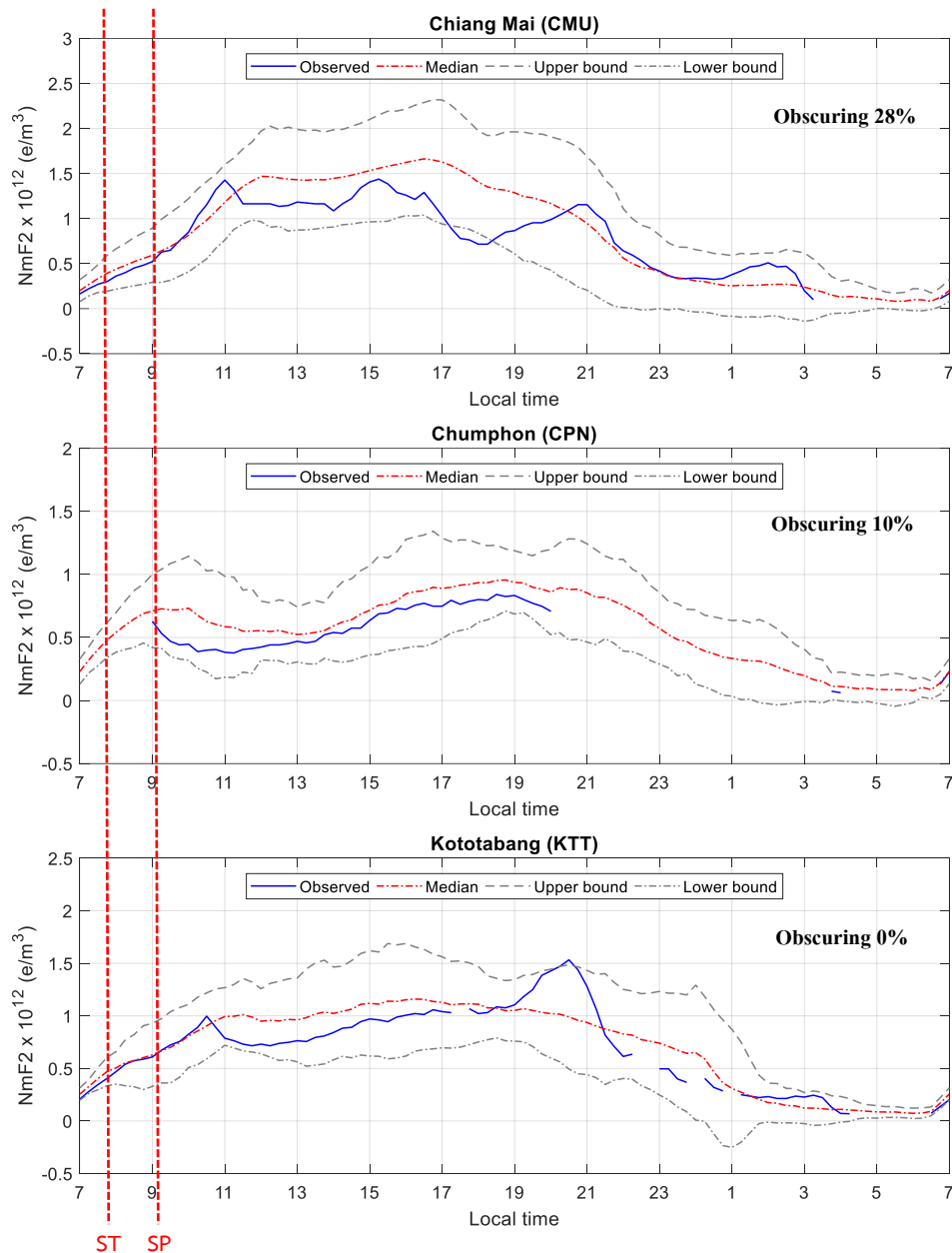
สำหรับค่าความแตกต่างของ NmF2 จากรูปที่ 5.9 ที่สถานีเชียงใหม่ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.45 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.2 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.8 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ สำหรับสถานีชุมพรค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.4 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.3 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.10 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.70 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.75 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.01 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสำหรับสถานีโกโตตาบังค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.70 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.25 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.1 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.6 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตล่างมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.90 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.05 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ตามลำดับ

5.2.4 สุริยุปราคาวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550

จากรูปที่ 5.10 จะเห็นได้ว่าสถานีเชียงใหม่มีค่า NmF2 ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือน และวันที่ 14 มีนาคม 2550 มีค่า NmF2 สูงสุดอยู่ที่ประมาณ $2.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ สถานีชุมพรมีค่า NmF2 ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือนเช่นกัน ยกเว้นวันก่อนเกิดสุริยุปราคา 1 วันและวันที่เกิดสุริยุปราคา มีข้อมูลบางช่วงเวลาไม่สามารถเก็บค่าได้ จึงส่งผลทำให้เห็นค่าของ NmF2 ได้ไม่มาก และส่วนของสถานีโกโตตาบังมีค่า NmF2 ส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือน ยกเว้นวันที่เกิดสุริยุปราคา มีค่า NmF2 สูงสุดอยู่ที่ประมาณ $1.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ เนื่องจากมีการเกิดพายุแม่เหล็กระดับปานกลางถึงสูง Dst-index ($-100 \text{ nT} > \text{Dst} < -150 \text{ nT}$) และมีค่าการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กระดับปานกลางถึงสูง Kp-index ประมาณ Kp 5 ถึง Kp 7 ในช่วงวันก่อนเกิดสุริยุปราคาคือช่วงวันที่ 17-18 มีนาคม 2550 จึงส่งผลทำให้ค่าของ NmF2 มีค่าสูงกว่าวันอื่น ๆ



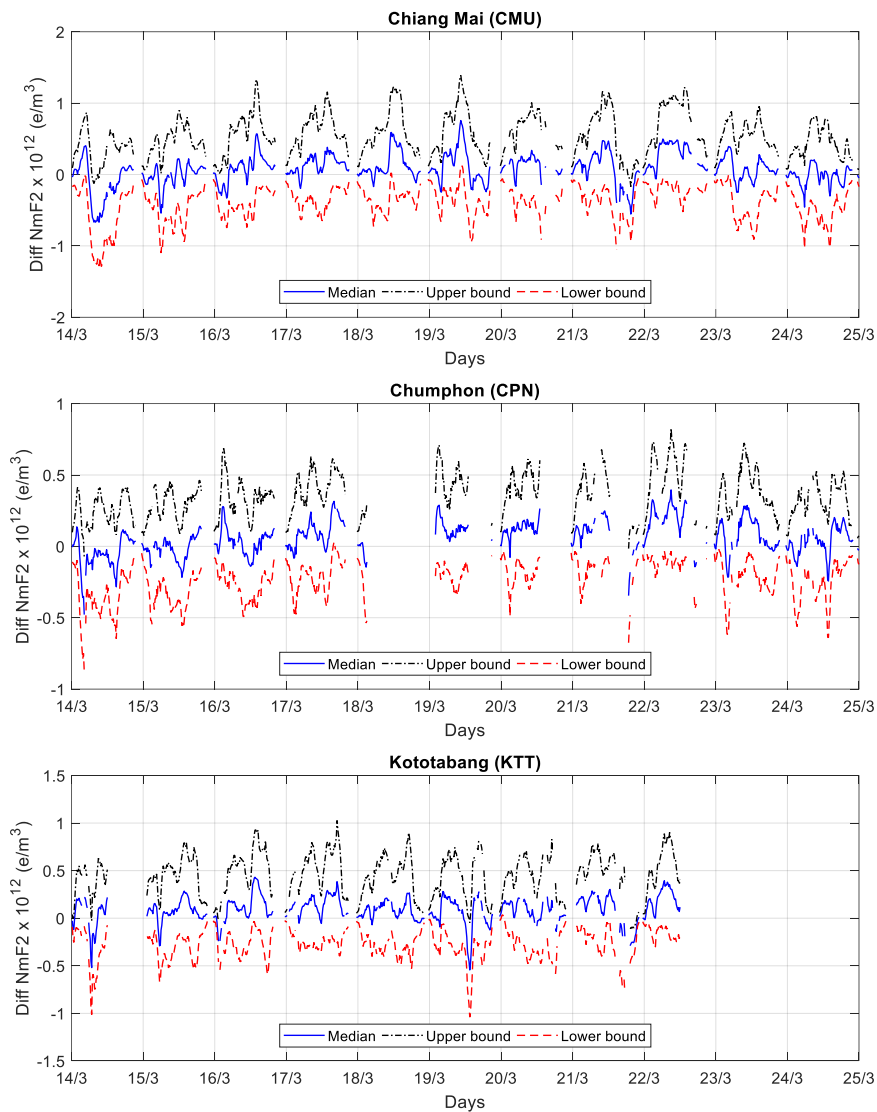
รูปที่ 5.10 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง) ตั้งแต่วันที่ 14 มีนาคม ถึง 24 มีนาคม 2550 และวันที่เกิดสุริยุปราคา คือวันที่ 19 มีนาคม 2550



รูปที่ 5.11 ค่าการเปลี่ยนแปลงของ NmF2 ในวันที่เกิดสุริยุปราคาวันที่ 19 มีนาคม 2550 ที่สถานี เชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตาบัง (รูปล่าง)

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลของวันที่ 19 มีนาคม 2550 ในรูปที่ 5.11 พบว่าในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคา ช่วงเวลาเริ่มเกิดประมาณเวลา 07:45 น. และสิ้นสุดที่เวลา 09:15 น. ระยะเวลารวมประมาณ 1 ชั่วโมง 30 นาที ซึ่งมองเห็นได้ในประเทศไทย เอเชียใต้ บางส่วนของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเอเชียตะวันออก รวมทั้งบางส่วนของอะแลสกาในอเมริกาเหนือ ประเทศไทยมองเห็นได้เกือบทั่วประเทศยกเว้นจังหวัดชายแดนภาคใต้ บริเวณที่เห็นดวงอาทิตย์แห้วมากที่สุดคือด้านตะวันตกเฉียง

เหนือของภาคเหนือ ส่วนเวลาที่เกิดจะแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังของแต่ละสถานีคือสถานีเชียงใหม่ 28% สถานีชุมพร 10% และสถานีโกโตตบบังมองไม่เห็นการเกิดสุริยุปราคาในครั้งนี้ จึงทำให้สถานีเชียงใหม่มีค่า NmF2 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนเล็กน้อย และในช่วงวันที่เกิดสุริยุปราคาหลังจากเวลา 11:00 น. มีค่า NmF2 ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับสถานีอื่น ๆ สถานีชุมพรในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคาไม่มีข้อมูลของค่า NmF2 จึงทำให้ไม่สามารถนำผลมาวิเคราะห์ได้ และในส่วนของสถานีโกโตตบบังมองไม่เห็นการเกิดสุริยุปราคาในครั้งนี้ จึงมีค่า NmF2 ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยรายเดือนมากที่สุดจากข้อมูลทั้งหมด 3 สถานี



รูปที่ 5.12 ความแตกต่างของ NmF2 ระหว่างค่าเฉลี่ยรายเดือนเมื่อเทียบกับขอบเขตอ้างอิงด้านบน (UB) ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง (LB) ที่สถานีเชียงใหม่ (รูปบน) สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตบบัง (รูปล่าง)

สำหรับค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 พบว่าที่สถานีเชียงใหม่ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าเฉลี่ยแตกต่างกันระหว่าง $-0.60 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.70 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.15 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.3 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.10 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.30 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ สำหรับสถานีชุมพรค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.5 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.3 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.05 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.80 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตอ้างอิงด้านล่างมีค่าความแตกต่างกันอยู่ระหว่าง $-0.85 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.01 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และสถานีโกโตตราบังค่าเฉลี่ยมีค่าความแตกต่างระหว่าง $-0.52 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.40 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ขอบเขตอ้างอิงด้านบนมีค่าของความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-0.01 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $1.0 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ และขอบเขตล่างมีค่าความแตกต่างอยู่ระหว่าง $-1.05 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ถึง $0.01 \times 10^{12} \text{ e/m}^3$ ตามลำดับ โดยมีข้อมูลบางช่วงที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้จึงส่งผลทำให้ค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 บางช่วงหายไป ดังรูปที่ 5.12

5.3 สรุป

จากการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 เทียบกับการเกิดสุริยุปราคาในช่วงวันที่เกิดสุริยุปราคาจำนวน 4 ครั้ง คือวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2550, วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2552, วันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2553 และวันที่ 9 มีนาคม พ.ศ. 2559 พบว่าในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 มีการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดของวันที่เกิดสุริยุปราคาในแต่ละสถานี ซึ่งถ้ามีการบดบังมากจะทำให้ค่า NmF2 มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนมาก ส่งผลให้ค่าความถี่วิกฤตของชั้นบรรยากาศ F2 หรือ foF2 มีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความถี่ที่สามารถใช้งานได้ที่ระยะ 3,000 กิโลเมตร หรือ M(3000)F2 มีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งการเกิดพายุแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศอีกด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การสื่อสารทางโทรคมนาคมปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางการสื่อสารทำให้มนุษย์ในปัจจุบันสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้แม้ว่าจะอยู่ห่างไกลกัน จึงได้มีการศึกษาการส่งสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เพื่อใช้ในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะทางไกล ตลอดจนนำมาใช้ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยที่การส่งสัญญาณบางช่วงอาจเกิดความแปรปรวนของอิเล็กตรอนภายในชั้นบรรยากาศ และเพื่อนำไปออกแบบและพัฒนาเกี่ยวกับการติดต่อสื่อสารผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงมีวัตถุประสงค์ ในการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ และ $NmF2$ ในเวลาที่ต่าง ๆ กันเป็นรายชั่วโมง ที่ได้มาจากการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานีคือ สถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย โดยการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ.2553 จนถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2561 ทำศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่เก็บค่าได้ แบ่งตามกาลเวลาแบบรายวัน รายฤดูกาลและรายปี แล้วนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ซึ่งได้แสดงในบทที่ 4 และจากนั้นยังศึกษาและวิเคราะห์ความแปรปรวนของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ($NmF2$) ในวันที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศในบริเวณประเทศไทย ซึ่งแสดงในบทที่ 5 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ทั้งแบบ $M(3000)F2_{Obs}$ และ $M(3000)F2_{IRI}$ พบว่าทั้ง 3 สถานี คือสถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ และสถานีโกโตตาบัง มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน คือมีค่าลดลงก่อนช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นไปจนถึงช่วงที่ต่ำที่สุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน โดยที่สถานีชุมพรมีค่าต่ำที่สุด ต่อมาคือสถานีโกโตตาบัง และสุดท้ายคือสถานีเชียงใหม่ ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์มากที่สุด (High solar activity) เมื่อเทียบกับปีอื่น ๆ หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นของเช้าวันใหม่ โดยที่สถานีเชียงใหม่จะมีค่าสูงที่สุด ต่อมาคือสถานีชุมพร และสุดท้ายคือสถานีโกโตตาบัง ซึ่งเป็นปีที่มีปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์น้อย (Low solar activity) จึงสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ $M(3000)F2$ ที่ได้จะมีค่าแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์และค่าความถี่วิกฤตในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ $NmF2$ ทั้งแบบ $NmF2_{Obs}$ และ $NmF2_{IRI}$ พบว่าที่สถานีเชียงใหม่และสถานีโกโตตาบัง จะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันจนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ตกดิน ก่อนที่จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงจุดที่ต่ำที่สุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นในเช้าวันใหม่ ในขณะที่สถานีชุมพรจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลง คือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นและมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงเวลาประมาณ 10.00-13.00 น.

เนื่องจากเกิดการพัดพาของอิเล็กตรอนไปในทิศทางอื่น ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในบริเวณสถานที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ทำให้ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศของบริเวณดังกล่าวมีจำนวนลดลง จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด (NmF2) มีค่าลดลงด้วย จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ตกดินและหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนถึงช่วงเวลาประมาณก่อนพระอาทิตย์ขึ้นในเช้าวันใหม่ และเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ NmF2 ทั้ง 3 สถานี พบว่าสถานีเชียงใหม่มีค่าพารามิเตอร์ NmF2 มากที่สุดเนื่องจากอยู่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 15 องศา ต่อมาคือสถานีโกโตตาบังที่สถานีตั้งอยู่ใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา และสถานีที่มีค่าพารามิเตอร์ NmF2 ต่ำที่สุด คือสถานีชุมพรซึ่งเป็นสถานที่ตั้งอยู่บริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กนั่นเอง จึงสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ NmF2 มีค่าแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์และค่าความถี่วิกฤตในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ผลการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 เทียบกับการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคา พบว่าในช่วงเวลาที่เกิดสุริยุปราคาความหนาแน่นของอิเล็กตรอน NmF2 มีการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับค่าเปอร์เซ็นต์การบดบังสูงสุดของวันที่เกิดสุริยุปราคาในแต่ละสถานี ซึ่งถ้ามีการบดบังมากจะทำให้ค่า NmF2 มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนมาก อีกทั้งการเกิดพายุแม่เหล็กและการสั่นสะเทือนของสนามแม่เหล็กยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่มนุษย์ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ในฐานะวิศวกรและนักวิจัยจึงได้ทำการศึกษาผลกระทบในช่วงเวลาที่เกิดปรากฏการณ์วิกฤตต่าง ๆ นี้ นับเป็นผลงานวิจัยใหม่ที่ตอนนี้อย่างไม่มีนักวิจัยท่านใดได้ทำการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ได้ข้อมูลจากสถานีไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อีกทั้งยังมีข้อมูลในปีที่เกิดปรากฏการณ์สุริยุปราคาครั้งล่าสุดที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ ซึ่งอาจจะนำข้อมูลที่ได้นำมาศึกษาไปพัฒนาและปรับปรุงโมเดลต่าง ๆ ในอนาคต ทางนักวิจัยหวังว่าข้อมูลที่ได้นำมาศึกษาทั้งหมดนี้จะมีคุณค่าและเป็นประโยชน์ต่อองค์กรต่าง ๆ เช่น กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช), กรมอุตุนิยมวิทยา, การส่งคลื่นสัญญาณของการทหาร หรือกลุ่มนักวิจัยอื่นๆ ที่สนใจในเรื่องนี้ต่อไป

ข้อเสนอแนะของการทำวิทยานิพนธ์นี้ ควรมีการพัฒนาการเก็บข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสถานีไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นภาพไอโอโนแกรมให้เป็นอัตโนมัติหรือเขียนโปรแกรมเข้าไป เนื่องจากใช้เวลาเก็บข้อมูลค่อนข้างนานและอาจจะมีความคลาดเคลื่อนจากการเก็บข้อมูลอยู่ ทั้งนี้เพื่อความสะดวกรวดเร็ว และความถูกต้องแม่นยำในการเก็บหรือวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และควรทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ และทำการเก็บข้อมูลจากหลายสถานี เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากสถิติจุดต่าง ๆ

บรรณานุกรม

- [1] M. Littmann, F. Espenak, and K. Willcox, **Totality : Eclipses of the sun**, 3rd edition, Oxford University Press Inc., Newyork, 2008.
- [2] O.J. Adeniyi, S.M. Radicella, I.A. Adimula, A.A. Willoughby, O.A. Oladipo, and O. Olawepo, “**Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station,**” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, A06314, 2007, pp. 1-10.
- [3] H. Le, L. Liu, X. Yue, and W. Wan, “**The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse : observations and modelling,**” *Journal of Annales Geophysicae*, Vol. 26, 2008, pp. 107-116.
- [4] G. Chen, Z. Zhao, B. Ning, Z. Deng, G. Yang, C. Zhou, M. Yao, S. Li, and N. Li, “**Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010,**” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A06301, 2011, pp. 1-10.
- [5] M. Pietrella, M. Pezzopane, and A. Settini, “**Ionospheric response under the influence of the solar eclipse occurred on 20 March 2015 : Importance of autoscaled data and their assimilation for obtaining a reliable modeling of the ionosphere,**” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 146, 2016 pp. 49-57.
- [6] V.U. Chukwuma, and B.J. Adekoya, “**the effects of March 20 2015 solar eclipse on the F2 layer in the mid-latitude,**” *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 58, 2016, pp. 1720-1731.
- [7] M. Pezzopane, M. Pietrella, A. Pignalberi, and R. Tozzi, “**20 March 2015 solar eclipse influence on sporadic E layer,**” *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 56, 2015, pp. 2064-2072.
- [8] Z. Mosna, J. Boska, P.K. Knizova, T. Sindelarova, D. Kouba, J. Chum, L. Rejtek, K. Potuznikova, F. Arian, and C. Toker, “**Obsevation of the solar eclipse of 20 March 2015 at the Pruhonice station,**” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 171, 2018, 277-284.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] L.F. Chernogor, I.F. Domnin, L.Y. Emelyanov, and M.V. Lyashenko, “**Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6°N, 36.3°E),**” Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 182, 2019, pp. 1-9.
- [10] T.G.W. Verhulst, and S.M. Stankov, “**Ionospheric wave signature of the American solar eclipse on 21 August 2017 in Europe,**” Journal of Advance in Space Research, Vol. 61, 2018, pp. 2245-2251.
- [11] Sciencesittisak “**ชั้นบรรยากาศต่าง ๆ ของโลก**” [Online]. Available :
<https://sites.google.com/site/sciencesittisak/content01/content011>
- [12] นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์. “**การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟคเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ บริเวณละติจูดต่ำ**” ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- [13] Oocities “**ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (The Ionosphere)**” [Online]. Available :
http://www.oocities.org/ten_2548/chapter8.html
- [14] Electronicsnotes “**Ionosonde & Ionogram**” [Online]. Available :
<https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/ionospheric/ionosonde-ionogram.php>
- [15] T. Onkoh, and K. Marubashi, Science of space environment, Ohmsha, Ltd., Japan, 2001.
- [16] N. Wakai, H. Ohyama, and T. Koizumi, “**Example of typical ionogram,**” Manual of Ionogram Scaling Third Version, 1987.
- [17] M. Ishii, “**Japanese space weather research activity,**” Journal of space weather, Vol. 15, 2017, pp. 26-35.
- [18] N. Wichaipanich, S. Suwanampai, K. Hozumi, “**Anomalous variations of ionospheric F2-layer critical frequency prior to the earthquake of September 30, 2009 affecting Thailand,**” The 18th international symposium on communications and information technologies (ISCIT 2018), 2018, pp. 412-415.
- [19] IRI-model “**International Reference Ionosphere**” [Online]. Available :
<http://irimodel.org>
- [20] Serge Stroobandt “**Ionogram Information**” [Online]. Available :
<https://hamwaves.com/ionograms/en/index.html>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] NICT “**SouthEast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION)**” [Online]. Available : <https://aer-nc-web.nict.go.jp/sealion/>
- [22] วรเชษฐ์ บัญปลอด “**สมาคมดาราศาสตร์ไทย**” [Online]. Available : <http://thaiastro.nectec.or.th/>
- [23] วรเชษฐ์ บัญปลอด “**สมาคมดาราศาสตร์ไทย สุริยุปราคา 19 มีนาคม 2550**” [Online]. Available : <http://thaiastro.nectec.or.th/skyevent/eclipses/200703pse.html>
- [24] วรเชษฐ์ บัญปลอด “**สมาคมดาราศาสตร์ไทย สุริยุปราคา 22 กรกฎาคม 2552**” [Online]. Available : <http://thaiastro.nectec.or.th/skyevent/eclipses/200907tse.html>
- [25] วรเชษฐ์ บัญปลอด “**สมาคมดาราศาสตร์ไทย สุริยุปราคา 15 มกราคม 2553**” [Online]. Available : <http://thaiastro.nectec.or.th/skyevent/eclipses/201001ase.html>
- [26] วรเชษฐ์ บัญปลอด “**สมาคมดาราศาสตร์ไทย สุริยุปราคา 9 มีนาคม พ.ศ.2559**” [Online]. Available : <http://thaiastro.nectec.or.th/skyevent/article/solar-eclipse-2016-mar/>
- [27] Spaceweatherlive “**Solar Cycle progression**” [Online]. Available : <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle.html>
- [28] Prof.Dr.Pornchai Supnithi “**Ionospheric Observatory station at Chumphon, Thailand**” [Online]. Available : http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=668
- [29] T. Shimazaki, “**World-wide variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer,**” J. Radio Res. Labs. Japan, 2 (7), 85-97, 1955.
- [30] M. Nakamura, “**Quick Reference of Manual Scaling for SPECIAL scaling from Manual of Ionogram Scaling,**” Communications Research laboratory. Tokyo, Japan, 2003.
- [31] D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V.N. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, and X. Huang, “**International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climateto real-time weather predictions,**” Space weather, 15, 418-429, 2017.
- [32] N. Wichaipanich, P. Supnithi, M.Ishii and T. Maruyama, “**Ionospheric variation at Thailand equatorial latitude station: Comparison between observations and IRI-2001 model predictions,**” Advance in Space Research, Vol. 45, pp. 284-293, 2010.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [33] N. Wichaipanich, P. Supnithi, T. Tsugawa, T. Maruyama, T. Nagatsuma, “**Comparison of ionosphere characteristic parameters obtained by ionosonde with IRI-2007 model over Southeast Asia,**” *Advance in Space Research*, Vol. 52, pp. 1748-1755, 2013.
- [34] M. Pezzopane, M. Pietrella, A. Pignatelli, B. Zolesi, Lj.R. Cander, “**Testing the three-dimensional IRI-SIRMUP-P mapping of the ionosphere for disturbed periods,**” *Advances in Space Research*, Vol. 52, pp. 1726–1736, 2013.
- [35] R.G. Ezquer, M. Pezzopane, J.L. López, L.A. Scidá, M.A. Cabrera, B. Zolesi, C. Bianchi, E. Zuccheretti, M. Mosert, “**Behaviour of ionospheric magnitudes of F2 region over Tucumán during a deep solar minimum and comparison with the IRI 2012 model predictions,**” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 107, pp. 89–98, 2014.
- [36] M. Pietrella, “**Short-term forecasting regional model to predict M(3000)F2 over the European sector: Comparisons with the IRI model during moderate, disturbed, and very disturbed geomagnetic conditions,**” *Advances in Space Research*, Vol. 54, pp. 133–149, 2014.
- [37] Fahmi A. Mohammed, “**Comparison of peak height of the F2-layer (hmF2) measurements with IRI-2012, IRI-2007 and IRI-2001 models predictions above Roquetes station (Spain) during the ascending phase of the solar cycle 24,**” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 132, pp. 101–105, 2015.
- [38] F. Azpilicueta, D. Altadill, C. Brunini, J.M. Torta, E. Blanch, “**A comparison of the LPIM-COSMIC F2 peak parameters determinations against the IRI(CCIR),**” *Advances in Space Research*, Vol. 55, pp. 2012–2019, 2015.
- [39] L. Perna, K. Venkatesh, V.G. Pillat, M. Pezzopane, P.R. Fagundes, R.G. Ezquer, M.A. Cabrera, “**Bottom side profiles for two close stations at the southern crest of the EIA: Differences and comparison with IRI-2012 and NeQuick2 for low and high solar activity,**” *Advances in Space Research*, Vol. 61, pp. 295–315, 2018.
- [40] The Community Coordinated Modeling Center (CCMC) “**International Reference Ionosphere - IRI (2016) with IGRF-13 coefficients**” [Online]. Available : https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 1) N. Insakun, N. Wichaipanich, K. Hozumi, **“9 March 2016 Solar Eclipse Effects F2 Layer Peak Electron Density at Conjugate Points over Southeast Asia Region,”** 2019 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), pp.278-282, 2019.
- 2) N. Insakun, N. Wichaipanich, K. Hozumi, **“Comparison of M(3000)F2 Variation between Measured Data by Ionosonde and IRI-2016 Model Data over Chiang Mai, Thailand,”** 2020 17th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp.197-200. 2020.

9 March 2016 Solar Eclipse Effects F2 Layer Peak Electron Density at Conjugate Points over Southeast Asia Region

1st Nimit Insakun
Department of Electronics and
Telecommunication Engineering,
Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology
Thanyaburi,
Pathum Thani, Thailand
nimit_i@en.rmutt.ac.th

2nd Noraset Wichaipanich
Department of Electronics and
Telecommunication Engineering,
Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology
Thanyaburi,
Pathum Thani, Thailand
noraset.w@en.rmutt.ac.th

3rd Kornyanat Hozumi
Space Environment Laboratory,
Applied Electromagnetic Research
Institute,
National Institute of Information and
Communications Technology
Tokyo, Japan
kukkai@nict.go.jp

Abstract—In this paper, the effect of March 9, 2016 solar eclipse on the F2 layer peak electron density (NmF2) at conjugate points in Southeast Asia is presented. NmF2 is calculated from the F2 layer critical frequency (foF2) that is manually scaled from three ionosonde stations in Southeast Asia region. Two ionosonde stations are in Thailand, namely Chiang Mai (18.76°N, 98.93°E, Dip 12.7°N) and Chumphon (10.72°N, 99.38°E, Dip 3.2°N). One station is in Indonesia, namely Kototabang (0.2°S, 100.32°E, Dip 10.1°S). These ionosonde stations are located at conjugate points in Southeast Asia. The daily interquartile range (every 15 minutes) of NmF2 data from 4th March to 15th March 2016 were analyzed the NmF2 variations during before and after the solar eclipse day on 9th March 2016. Besides, the monthly median, the upper boundary and lower boundary of NmF2 compared with the observed ones were used for analyzing the anomalous variations. The results of this study indicate that the NmF2 value increases during 2 days before and after the eclipse day while it decreases on solar eclipse day for all 3 stations.

Keywords—solar eclipse, NmF2, foF2, conjugate points, EIA

I. INTRODUCTION

Solar eclipse is the natural phenomenon that occurs when the sun, the moon and the earth orbit align in the same line by the moon in the middle. The moon slowly moved to shadows of the sun during a solar eclipse observed from the earth. Overshadow may be fully obscured or covered any part. Solar eclipse can occur twice a year, but no more than 5 times a year [1]. Solar eclipse phenomenon affects the ionospheric variations. There are several techniques to study the effects of a solar eclipse in the ionosphere such as the ionosonde technique, the Faraday rotation measurements, the satellite and rocket technique, the incoherent scatter radar (ISR) technique, the global positioning system (GPS) technique, the Doppler sounding technique, etc. One of the most popular techniques is the ionosonde technique. Therefore, this paper focuses only on the ionosonde technique.

Many works used the ionosonde technique to study the ionospheric variation during a solar eclipse [2]-[10]. Adeniyi et. al, [2] presented the effects of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over Ilorin, Nigeria. The obscuration reached to 99% before the midday in this station. The critical frequency of E (foE), F1 (foF1), F2 (foF2) and the height electron density profile were analyzed. In [3], the foE, foF1, foF2, the peak electron density of E

(NmE) and F1 (NmF1) layer and the peak height (hmF2) obtained by sixteen ionosonde stations in Europe region were observed the ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse. Chen et. al, [4] proposed the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010 in the equatorial ionization anomaly (EIA) over China region. The F2 layer apparent high (h'F2) and critical frequency (foF2) measured by three vertical-incidence and seven oblique-incidence ionosondes arranged along the meridian from geomagnetic latitudes 18°N to 30°N in eastern China. In [5], the influence of the solar eclipse occurred on 20 March 2015 were considered. The foF2 values measured at Rome and Gibilmanna in Italy and the electron density profile auto scaled by the Automatic Real-Time Ionogram Scatter with True-height (ARTIST) at San Vito in Italy; then were analyzed in a time interval of the eclipse occur. Similarly, Chukwuma and Adekoya [6] submitted the effects of 20 March 2015 solar eclipse on the F2-layer in the mid-latitude. NmF2 and hmF2 data scaled from six ionosonde stations were delineated. Furthermore, the ionospheric responses to 20 March 2015 solar eclipse over Italy, Czech Republic and Ukraine were suggested in [7]-[9], respectively. Besides, the effects on 21 August 2017 solar eclipse in Europe was proposed by Verhulst and Stankov [10].

Although the ionospheric responses of the solar eclipse have been studied in many parts of the world, the effects of the ionosphere during solar eclipse in Thailand are scarce. Therefore, this paper presents the ionospheric F2 layer observation during solar eclipse of 9 March 2016 over Southeast Asia region. The F2 peak electron density (NmF2) is used for analyzing the influence during the eclipse occur.

NmF2 is very important for designing, managing and modeling in HF communication systems. It is calculated from the F2 layer critical frequency (foF2) [11] as shown in eq. (1)

$$NmF2 = (foF2)^2 / 80.5 \quad (1)$$

foF2 parameter is the maximum frequency in F2 layer that can be reflected by near vertical incidence sounding (NVIS) of the ionosonde technique (See more ionosonde details in [11]-[13]). It is manually scaled from the ionograms, by using the special-10C-2000-eng.exe program to read the raw ionogram data, that recorded by the

ionosonde stations [12]. Three ionosonde stations consisted of Chiang Mai, Chumphon, and Kotatabang stations are used for this work. The location of 3 stations are at Southeast Asia conjugate points that are installed nearly along the magnetic meridian of 100°E; one is at the magnetic equator, Chumphon (latitude 10.72°N, longitude 99.37°E, magnetic dip latitude 3.0°N), and the others are at the magnetically conjugate points, Chiang Mai (latitude 18.76°N, longitude 98.93°E, magnetic dip latitude 12.7°N), and Kototabang (latitude 0.2°S, longitude 100.30°E, magnetic dip latitude 10.1°S). Besides, these stations are located at Equatorial Ionization Anomaly (EIA) region as shown in Fig. 1.

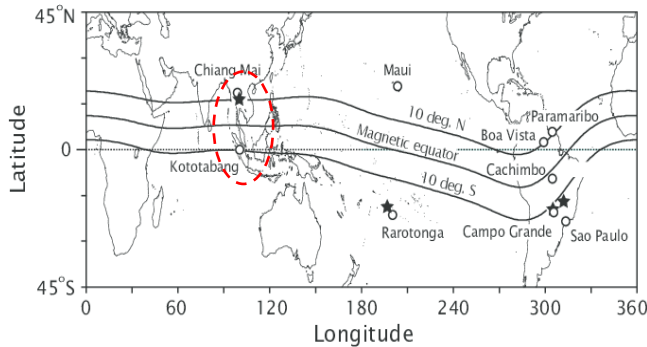


Fig. 1. Worldmap of the equatorial ionization anomaly (EIA) [2].

EIA is an area that consisting of an ionospheric region with high electron density peaks, observed around 15 degrees north and south of the magnetic equator. For the world, only the South America in Brazil and the Southeast Asia region that can place the equipment to study the variation of the ionosphere in this area. Thus, the effects of 9 March 2016 solar eclipse on the NmF2 variations over Southeast Asia conjugate points is proposed in this study.

The data and analysis method, the results and discussions, and conclusions are described in Section II, III and IV, respectively.

II. DATA AND ANALYSIS METHOD

The NmF2 data calculated from the foF2 data every 15 minutes during 4-14 March 2016 are used in this study. The solar eclipse occurs on 9 March 2016 while 5 days before and after eclipse show the increase of control days.

The foF2 data are measured from 3 three ionosonde stations. Two stations are in Thailand, namely Chiang Mai and Chumphon. One station is in Indonesia, namely Kototabang. Chiang Mai station is installed at Chiang Mai University, Thailand. The position is of latitude 18.76 degrees north, longitude 98.93 degrees east and geomagnetic latitude 12.7 degrees north. It is the northern crest of the EIA. Chumphon station is installed at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Thailand. The position is of latitude 10.7 degrees north, longitude 99.37 degrees east and geomagnetic latitude 3.22 degrees north. It is the equatorial. Kototabang station is installed at National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Indonesia. The position is of latitude -0.20 degrees, longitude 100.32 degrees east and geomagnetic latitude -10.1 degrees north. It is the southern crest of the EIA. These stations are three of six ionosonde stations of

Southeast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION) project that are supported by the National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan [13].

In addition, the reference upper boundary (UB) and the reference lower boundary (LB) are used to compare the results of the analysis. Both UB and LB can be calculated from the equation (2) and (3) [14].

$$UB = \bar{X} + 2S \quad (2)$$

$$LB = \bar{X} - 2S \quad (3)$$

Where \bar{X} is the monthly median of NmF2 data, and S is the standard deviation. UB is the reference upper boundary and LB is the reference lower boundary.

The difference between the maximum electron density (NmF2) and the monthly median of NmF2 data are the reference upper boundary (UB) and the reference lower boundary (LB). Both boundaries are calculated from the equation (4).

$$Diff NmF2 = NmF2_x - NmF2_{obs} \quad (4)$$

Where $NmF2_x$ are the monthly median, while $NmF2_{obs}$ is the observed of NmF2.

Solar eclipse day on 9 March 2016 starts at 06:38 LT and ends at 8:32 LT. The total duration time is 1 hour 54 minutes. The obscuration reaches to 27.1% for Chiang Mai, 47.9% for Chumphon and 100% over Kototabang, respectively.

In addition, the Dst-index data can be downloaded from <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>. Meanwhile, the Kp-index data is downloaded from <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

Fig. 2 shows the comparison between the dst-index, the Kp-index, and the NmF2 data from three ionosonde stations during 4 March 2016 to 14 March 2016. These days indicate the variation 5 days before and after period of solar eclipse day on 9 March 2016. In addition, the observed NmF2 is shown in the solid blue line. The monthly median of NmF2 data is shown as a red dot dashed line, the reference upper boundary (UB) is shown as a gray dashed line, and the reference lower boundary (LB) is shown as a gray dot dashed line. The NmF2 data is lack from noontime to nighttime of the eclipse day at Kototabang station since the foF2 data cannot be scaled from the ionogram in this period. For Dst-index, the data varies between -100 nT and 50 nT. Most of the results show the storm types in the minor storm (-20 nT > Dst < -50 nT) for all days except 2 days before the eclipse day when it shows the moderate storm (-50 nT > Dst < -100 nT). For Kp-index, the data varies from 0 to 6. Kp-index levels from Kp 4 to Kp 6 show the active, the minor storm and the moderate storm, respectively. For all three stations, most of the results show similar variations of the NmF2 values that the variability increases during sunrise, reaches the peak values around noontime, decreases during post-noontime to nighttime, and reaches the lowest level during pre-sunrise hours. Besides, the observed NmF2 is higher than

that the monthly median and the reference lower boundary (LB) while it is close to the reference upper boundary (UB). Especially, the results of the observed NmF2 during 2 days (7 March 2016) before the eclipse day are the highest value. During the eclipse day (9 March 2016), the results for all 3 stations show the observed that are lower than those the median. After eclipse day, the observed value is close to the median except 1 day (10 March 2016) which is higher than

the median and it is close to the UB. According to the comparison of NmF2 between 3 stations, the results show that the NmF2 values in the equatorial (Chumphon) is lower than in the northern crest (Chiang Mai) and the southern crests (Kototabang) of the EIA region because the fountain effect occurs in the EIA region affecting to high electron density in the northern and southern crests of the EIA and low electron density in the equatorial latitude station [11].

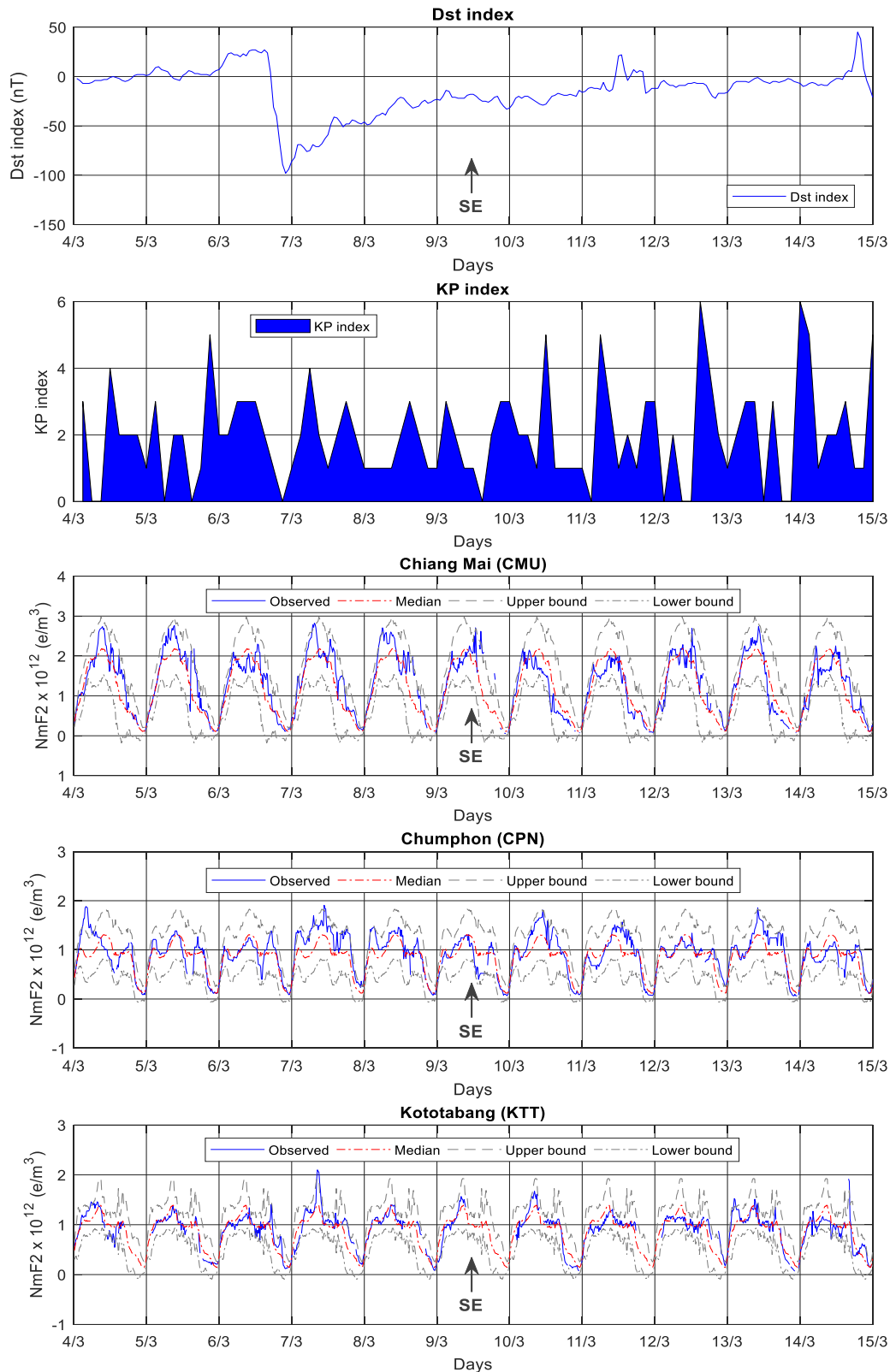


Fig. 2. The comparison between the Dst-index, the Kp-index, and the NmF2 values at Chiang Mai, Chumphon and Kototabang from 4 March to 14 March 2016, the date of the solar eclipse is 9 March 2016.

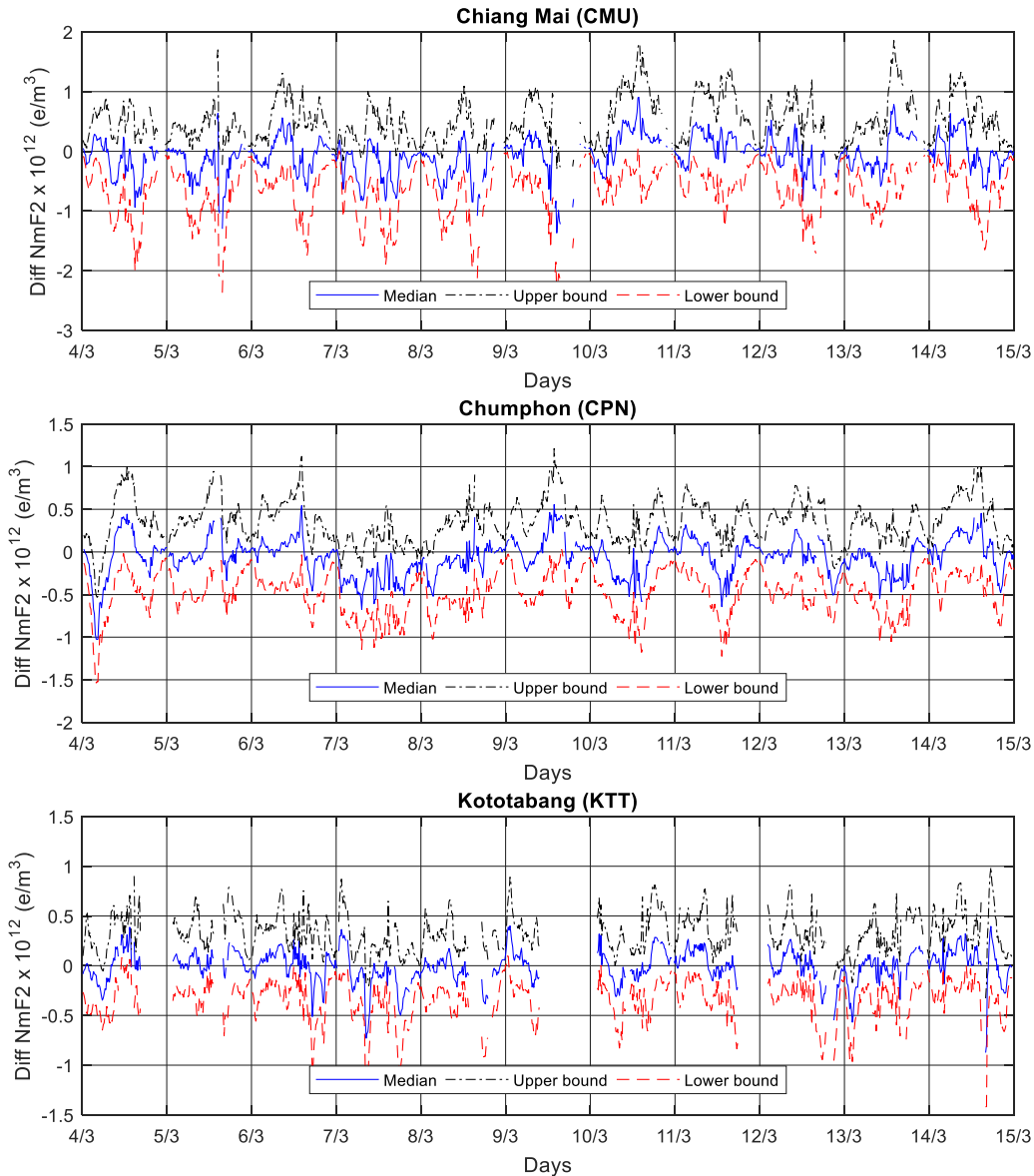


Fig. 3. The difference of NmF2 between the monthly median compared with the reference upper boundary (UB) and the reference lower boundary (LB) over Chiang Mai, Chumphon and Kototabang stations.

Fig. 3 shows the difference of NmF2 between the monthly median (Median), the reference upper boundary (Upper bound) and the reference lower boundary (Lower bound). The results at Chiang Mai, Chumphon and Kototabang stations are illustrated in the top, middle and bottom panels, respectively. The blue solid line is the monthly median, the black dot dashed line is the upper bound and the red dashed line is the lower bound. For Chiang Mai, the results show that the median vary between $\pm 1 \times 10^{12}$ e/m³ while the upper bound vary from -0.5×10^{12} e/m³ to 1.5×10^{12} e/m³ and the lower bound vary from -2×10^{12} e/m³ to -0.1×10^{12} e/m³. For Chumphon, the median vary from -1×10^{12} e/m³ to 0.5×10^{12} e/m³ while the upper bound vary from -0.5×10^{12} e/m³ to 1.1×10^{12} e/m³ and the lower bound vary from -1.5×10^{12} e/m³ to -0.2×10^{12} e/m³. Similarly in Kototabang, the median vary from -1×10^{12} e/m³ to 0.5×10^{12} e/m³ while the upper bound vary from 0.1×10^{12} e/m³ to 0.9×10^{12} e/m³ and the lower bound vary from -1.0×10^{12} e/m³ to 0.2×10^{12} e/m³.

IV. CONCLUSIONS

This paper presented the variation of NmF2 before the solar eclipse of March 9, 2016 based on the ionosonde stations at conjugate points over Southeast Asia region. The results indicated that the observed NmF2 increased anomalies 2 days before the eclipse occurred. Meanwhile, the observed NmF2 decreased in solar eclipse day. Besides, the NmF2 at equatorial was lower than that the northern crest and the southern crest of the EIA. This is only one technique and one case of the observation during the solar eclipse.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank the Space Environment Laboratory, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan, and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Thailand, for the equipment and technical support via the SEALION project. We are grateful to Prof.Dr. Pornchai Supnithi, Assoc.Prof.Dr. Punyawit Jamjareegulgan,

Assoc.Prof. Narong Hemmakorn, Assoc.Prof. Nipa Leelaruij (KMITL, Thailand), Dr. Takuya Tsugawa, Dr. Mamoru Ishii and Dr. Takashi Maruyama (NICT, Japan), for all the devices and at most support.

REFERENCES

- [1] M. Littmann, F. Espenak, and K. Willcox, *Totality : Eclipses of the sun*, 3rd edition, Oxford University Press Inc., Newyork, 2008.
- [2] O.J. Adeniyi, S.M. Radicella, I.A. Adimula, A.A. Willoughby, O.A. Oladipo, and O. Olawepo, "Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, A06314, 2007, pp. 1-10.
- [3] H. Le, L. Liu, X. Yue, and W. Wan, "The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse : observations and modelling," *Journal of Annales Geophysicae*, Vol. 26, 2008, pp. 107-116.
- [4] G. Chen, Z. Zhao, B. Ning, Z. Deng, G. Yang, C. Zhou, M. Yao, S. Li, and N. Li, "Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipse of 15 January 2010," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A06301, 2011, pp. 1-10.
- [5] M. Pietrella, M. Pezzopane, and A. Settini, "Ionospheric response under the influence of the solar eclipse occurred on 20 March 2015 : Importance of autoscaled data and their assimilation for obtaining a reliable modeling of the ionosphere," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 146, 2016 pp. 49-57.
- [6] V.U. Chukwuma, and B.J. Adekoya, "the effects of March 20 2015 solar eclipse on the F2 layer in the mid-latitude," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 58, 2016, pp. 1720-1731.
- [7] M. Pezzopane, M. Pietrella, A. Pignalberi, and R. Tozzi, "20 March 2015 solar eclipse influence on sporadic E layer," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 56, 2015, pp. 2064-2072.
- [8] Z. Mosna, J. Boska, P.K. Knizova, T. Sindelarova, D. Kouba, J. Chum, L. Rejček, K. Potuznikova, F. Arikian, and C. Toker, "Obsevation of the solar eclipse of 20 March 2015 at the Pruhonice station," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 171, 2018, 277-284.
- [9] L.F. Chernogor, I.F. Dommín, L.Y. Emelyanov, and M.V. Lyashenko, "Physical processes in the ionosphere during the solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv, Ukraine (49.6°N, 36.3°E)," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 182, 2019, pp. 1-9.
- [10] T.G.W. Verhulst, and S.M. Stankov, "Ionospheric wave signature of the American solar eclipse on 21 August 2017 in Europe," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 61, 2018, pp. 2245-2251.
- [11] T. Onkoh, and K. Marubashi, *Science of space environment*, Ohmsha, Ltd., Japan, 2001.
- [12] N. Wakai, H. Ohyama, and T. Koizumi, "Example of typical ionogram," *Manual of Ionogram Scaling Third Version*, 1987.
- [13] M. Ishii, "Japanese space weather research activity," *Journal of space weather*, Vol. 15, 2017, pp. 26-35.
- [14] N. Wichaipanich, S. Suwanampai, K. Hozumi, "Anomalous variations of ionospheric F2-layer critical frequency prior to the earthquake of September 30, 2009 affecting Thailand," *The 18th international symposium on communications and information technologies (ISCIT 2018)*, 2018, pp. 412-415.

Comparison of M(3000)F2 Variation between Measured Data by Ionosonde and IRI-2016 Model Data over Chiang Mai, Thailand

1st Nimit Insakun
Department of Electronics and
Telecommunication Engineering,
Faculty of Engineering,
Rajamangala University of
Technology Thanyaburi
Pathum Thani, Thailand
nimit_i@en.rmutt.ac.th

2nd Noraset Wichaipanich
Department of Electronics and
Telecommunication Engineering,
Faculty of Engineering,
Rajamangala University of
Technology Thanyaburi
Pathum Thani, Thailand
noraset.w@en.rmutt.ac.th

3rd Kornyanat Hozumi
Space Environment Laboratory,
Applied Electromagnetic Research
Institute,
National Institute of Information and
Communications Technology
Tokyo, Japan
kukkai@nict.go.jp

Abstract—This paper presents a comparison of the ionospheric propagation factor M(3000)F2 measurements with IRI-2016 model predictions at Thailand low latitude station, namely Chiang Mai (18.76°N, 98.93°E, dip angle 12.7°N). The M(3000)F2 data in 2016 are scaled from the ionograms recorded by the ionosonde measurements. The hourly values of M(3000)F2 are analyzed based on the diurnal, seasonal, annual variations and compared with the IRI model predictions. Both observed and IRI model data showed similar variations in that decreasing from pre-sunrise to noontime hours (3-12LT), and increasing from afternoon time to post-midnight hours (13-03LT) with a few decreasing during post sunset hours (20-00LT). Furthermore, most of the results show the IRI model data gave the M(3000)F2 values close to the observed data during daytime and it underestimated the measured ones during nighttime. All of these studies have important effect on the development of future IRI-model for Southeast Asia.

Keywords— M(3000)F2, Ionograms, Ionosonde, IRI-model 2016

I. INTRODUCTION

The propagation factor of the ionospheric F2 layer or M(3000)F2 is an important parameter for designing the radio propagation in high frequency (HF) band and using in telecommunications military, navigational, aeronautical radio along with RFID (Radio Frequency Identification) systems, etc. M(3000)F2 is related with MUF(3000)F2, foF2 and hmF2 parameters as shown in eq. (1) and eq.(2), respectively.

$$M(3000)F2 = MUF(3000)F2/foF2 \quad (1)$$

$$hmF2 = (1470/M(3000)F2)-176 \quad (2)$$

Where MUF(3000)F2 is the maximum frequency that can be used at a distance of 3,000 kilometers, foF2 is the F2 layer critical frequency and hmF2 is the F2 layer peak high that can be computed from Shimazaki formula [1]. Both M(3000)F2 and foF2 parameters are manually scale recorded by the FM/CW ionosonde. The FM/CW ionosonde is a transceiver. It transmits the radio frequency in High Frequency (HF) band (3-30 MHz) to the ionosphere and receives the echo return. The return signal is recorded to image, called as “Ionogram”. Ionogram is measured the high and critical frequency in E and F layer. In this paper, both M(3000)F2 and foF2 are collected by using the *special-10C-2000.exe* program [2] as shown in Fig. 1.

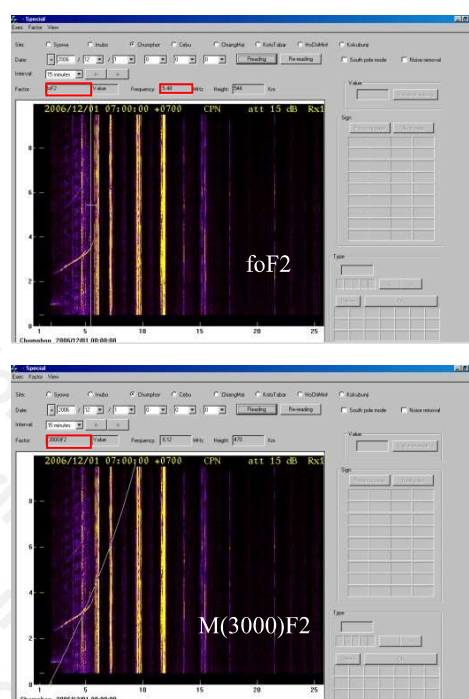


Fig. 1. The manually scaled between foF2 (Top panel) and M(3000)F2 (Bottom panel) parameters using the special scaling program.

These foF2, M(3000)F2 and hmF2 parameters are used for developing and improving the ionospheric model predictions. The International Reference Ionosphere (IRI) is widely used as the standard for the limitations of various variables in the ionosphere such as density electrons and temperatures of various layers. IRI-model is certified as international standards by COSPAR and URSI by evaluating multiple models to find the best IRI model. In 1999, URSI certified to approve the IRI-model as an international standard for ionosphere which IRI model was developed, revised, and updated continuously and updated the latest information in 2016, known as IRI-model 2016 [3].

There have been many studies the parameters compared with the previous version of the IRI-model, such as N. Wichaipanich et al. (2013) compare IRI-model 2001 [4]

and IRI-model 2007 [5], M. Pezzopane et al. (2013) [6], RG Ezquer et al. (2014) compare IRI-model 2012 [7], M. Pietrella et al. (2014) [8], Fahmi A. Mohammed et al. (2015) compare IRI-model 2001, IRI-model 2007 and IRI-model 2012 [9], F. Azpilicueta et al. (2015) [10], and L. Perna et al. (2018) compare IRI-model 2012 [11].

Although the comparison between the ionospheric observation and the IRI model prediction have been proposed in Thailand [4], there is only the observation of foF2 and hmF2 compared with the IRI model. The M(3000)F2 parameter compared with the model is scarce. In this paper, the comparison of M(3000)F2 measurements and the IRI-2016 model predictions at Chiang Mai station in Thailand is presented.

II. DATA AND ANALYSIS METHOD

Data used in this study are measured from the ionogram recorded by the ionosonde at Chiang Mai University (latitude 18.76°N, longitude 98.93°E and geomagnetic latitude 12.7°N), Thailand. This ionosonde station has been supported by the National Institute of Information and Communication Technology (NICT), Japan since 2003. The hourly values of M(3000)F2 in 2016 are analyzed based on the diurnal, seasonal, and annual variations. The observed M(3000)F2 is compared with the IRI-2016 model.

Seasonal variation can be divided into 4 seasons. Each season is the monthly hourly median of M(3000)F2 values consists of March equinox, June solstice, September equinox and December solstice.

The percentage difference of M(3000)F2 ($\Delta M(3000)F2$ (%)) between the observations and the IRI-2016 model predictions are calculated from

$$\Delta M(3000)F2 (\%) = \frac{[M(3000)F2_{IRI} - M(3000)F2_{Obs}]}{M(3000)F2_{Obs}} \times 100\% \quad (3)$$

where $M(3000)F2_{IRI}$ is the propagation factor of the ionospheric F2 layer predicted from the IRI-2016 model, while the $M(3000)F2_{Obs}$ is the M(3000)F2 observations obtained from the ionosonde at Chiang Mai station.

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The comparison between the $M(3000)F2_{Obs}$ compared with the $M(3000)F2_{IRI}$ at Chiang Mai on March 15th, 2016 is illustrated in Fig. 2. The blue line is the observed M(3000)F2 and the red dashed line shows the predicted from the IRI-2016 model. Both observed and IRI model show similarly variations that they decreased from pre-sunrise to noontime hours (3-12LT), and increased from afternoon time to post-midnight hours (13-03LT) with a few decreasing during post-sunset hours(20-00LT). Furthermore, the results show that the IRI model underestimates the observed M(3000)F2 from nighttime to pre-noontime while it overestimates the measured one from noontime to post-sunset hours (12-16LT). The observed M(3000)F2 varies between 2.5 and 3.5 MHz during daytime while it changes between 3.2 and 4 MHz during nighttime. For IRI model, the M(3000)F2 prediction values vary from 3.0-3.3 MHz for all day. The diurnal variation of $\Delta M(3000)F2$ (%) values on

March 15th, 2016 is shown in Fig. 3. The results show that the $\Delta M(3000)F2$ (%) value vary between -19% to 17.5%.

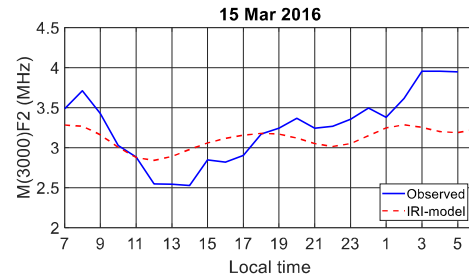


Fig. 2. The $M(3000)F2_{Obs}$ compared with the $M(3000)F2_{IRI}$ at Chiang Mai on March 15th, 2016.

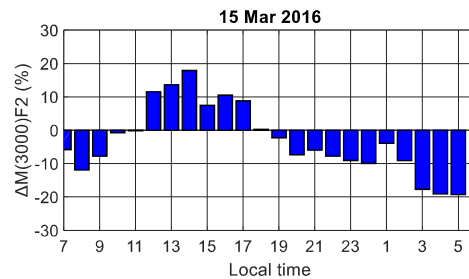


Fig. 3. The percentage difference of M(3000)F2 on March 15th, 2016.

Fig.4 shows the seasonal variation of the observed M(3000)F2 compared with the results from IRI model at Chiang Mai in the year of 2016. Most of the results show that both observed and predicted results have similar in seasonal variation. In March equinox season, the highest value is around 3.75 MHz and the lowest level is 2.6 MHz for the observed M(3000)F2. The IRI model gives the M(3000)F2 values close to the measured data during daytime, but it underestimates the observed ones during nighttime. In June solstice season, the observed M(3000)F2 varies from 2.5 MHz to 3.5 MHz while the model changes between 2.65 MHz and 3.25 MHz. The results in September equinox are similar to the results in March equinox, but a few different in that the highest values at 3.6 MHz and the lowest level at 2.8 MHz for the measured data. In December solstice season, the maximum and minimum values are 2.9 MHz and 3.55 MHz, respectively. Moreover, the results in both equinox seasons are higher than those in both solstice seasons.

The percentage variation of M(3000)F2 in different 4 seasons in 2016 are shown in Fig. 5. In March equinox, the $\Delta M(3000)F2$ (%) varies from -10% and 5% during the day and changes between -4% and -13% during the night. In June solstice, the $\Delta M(3000)F2$ (%) varies from -2.5% to -11% for all of the day except at 14-16LT when it changes from 2% to 3%. The results in September equinox show similar with the results in June solstice, however, the percentage in September equinox is higher than that in June solstice. Finally, the results in December solstice show the $\Delta M(3000)F2$ (%) changes between $\pm 5\%$ during daytime and it varies from -1% to -10% during nighttime. From Fig. 5, the best case occurred in June solstice season while the worst case occurred in March equinox season.

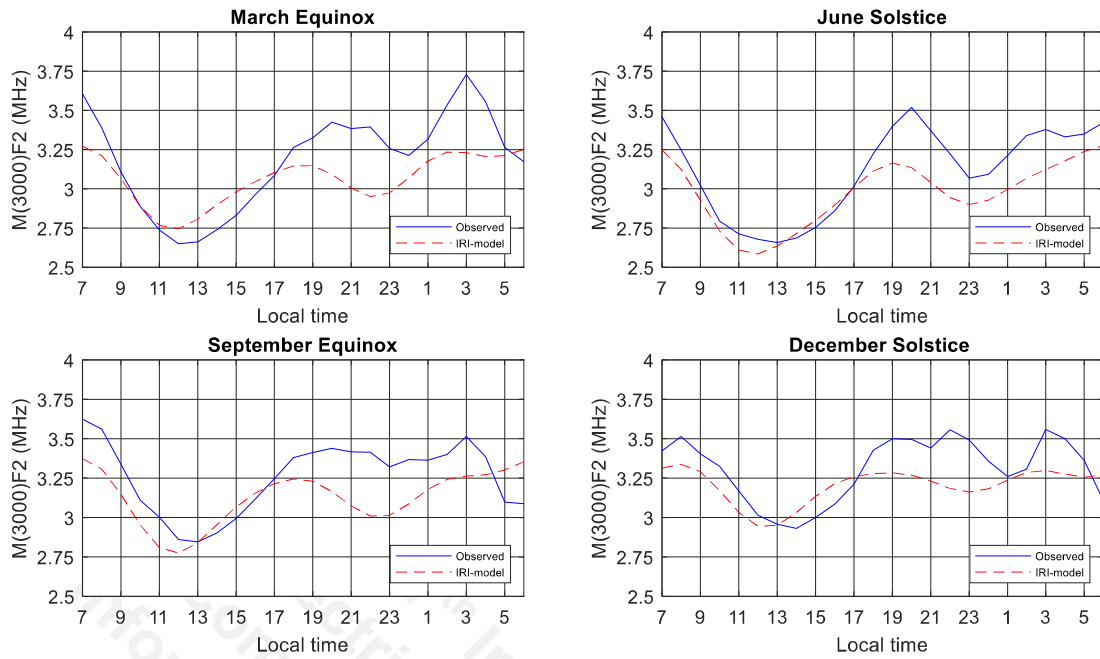


Fig. 4. The $M(3000)F2_{Obs}$ compared with the $M(3000)F2_{IRI}$ at Chiang Mai station for 4 seasons in 2016.

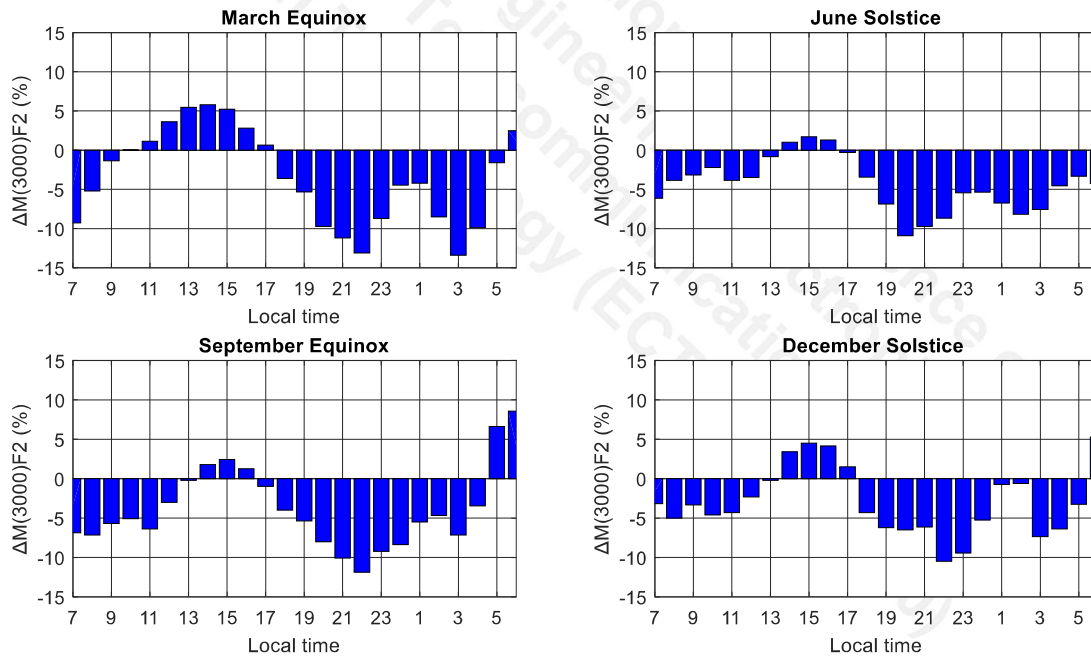


Fig. 5. Percentage variation of $M(3000)F2$ at different 4 seasons over Chiang Mai station.

The yearly hourly median of the $M(3000)F2_{Obs}$ compared with the $M(3000)F2_{IRI}$ at Chiang Mai in 2016 is illustrated in Fig. 6. The results show that the IRI model prediction values underestimate the measured ones for all of the day, especially during nighttime, except at 13-17LT when they overestimate the measured ones. The observed data vary from 2.75 MHz to 3.6 MHz while the results from IRI model change between 2.75 MHz and 3.3 MHz.

Fig. 7. Shows the percentage variation of $M(3000)F2$ in the year of 2016. The $\Delta M(3000)F2$ (%) varies from -6% to 4% during daytime and changes from -2% to -11% during nighttime.

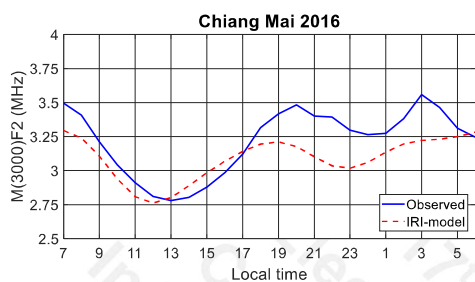


Fig. 6. Yearly hourly median of the $M(3000)F2_{Obs}$ compared with the $M(3000)F2_{IRI}$ at Chiang Mai station in 2016.

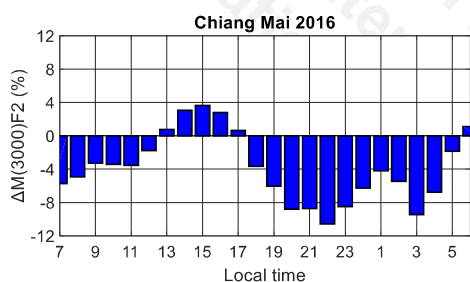


Fig. 7. The yearly percentage difference of $M(3000)F2$ in 2016.

IV. CONCLUSIONS

This paper presents the comparison of $M(3000)F2$ parameter between the collected data from ionosonde station located at Chiang Mai, Thailand in 2016 and data from IRI-model 2016 yearly, seasonally and daily. It is found that all 3 types have similar characteristics of $M(3000)F2$ parameter which it increases during the sunrise or in the time around 06-07LT and decreases during the time 09-13LT. It causes the electrons to blow in another direction (Bite out) which results in decreasing the amount of electrons in that area until a saturation point and increasing again until sunset at time

around 17-19LT. After that the value will gradually decrease because the atmosphere will not receive solar energy before increasing in the morning of the next day. The collected data is higher than the value obtained from the IRI-model because the Chiang Mai station is above the magnetic equator's latitude causing the prediction of parameters from the model is not accurate enough. In addition, the studies in the magnetic equator area in Thailand still very few compared to other latitudes.

REFERENCES

- [1] T. Shimazaki, "World-wide variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer," *J. Radio Res. Labs. Japan*, 2 (7), 85-97, 1955.
- [2] M. Nakamura, "Quick Reference of Manual Scaling for SPECIAL scaling from Manual of Ionogram Scaling," Communications Research laboratory. Tokyo, Japan, 2003.
- [3] D. Bilitza, D. Altadill, V. Truhlik, V.N. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, and X. Huang, "International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climateto real-time weather predictions," *Space weather*, 15, 418-429, 2017.
- [4] N. Wichaipanich, P. Supnithi, M.Ishii and T. Maruyama, "Ionospheric variation at Thailand equatorial latitude station: Comparison between observations and IRI-2001 model predictions," *Advance in Space Research*, Vol. 45, pp. 284-293, 2010.
- [5] N. Wichaipanich, P. Supnithi, T. Tsugawa, T. Maruyama, T. Nagatsuma, "Comparison of ionosphere characteristic parameters obtained by ionosonde with IRI-2007 model over Southeast Asia," *Advance in Space Research*, Vol. 52, pp. 1748-1755, 2013.
- [6] M. Pezzopane, M. Pietrella, A. Pignatelli, B. Zolesi, Lj.R. Cander, "Testing the three-dimensional IRI-SIRMUP-P mapping of the ionosphere for disturbed periods," *Advances in Space Research*, Vol. 52, pp. 1726-1736, 2013.
- [7] R.G. Ezquer, M. Pezzopane, J.L. López, L.A. Scidá, M.A. Cabrera, B. Zolesi, C. Bianchi, E. Zuccheretti, M. Mosert, "Behaviour of ionospheric magnitudes of F2 region over Tucumán during a deep solar minimum and comparison with the IRI 2012 model predictions," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 107, pp. 89-98, 2014.
- [8] M. Pietrella, "Short-term forecasting regional model to predict $M(3000)F2$ over the European sector: Comparisons with the IRI model during moderate, disturbed, and very disturbed geomagnetic conditions," *Advances in Space Research*, Vol. 54, pp. 133-149, 2014.
- [9] Fahmi A. Mohammed, "Comparison of peak height of the F2-layer ($hmF2$) measurements with IRI-2012, IRI-2007 and IRI-2001 models predictions above Roquetes station (Spain) during the ascending phase of the solar cycle 24," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 132, pp. 101-105, 2015.
- [10] F. Azpilicueta, D. Altadill, C. Brunini, J.M. Torta, E. Blanch, "A comparison of the LPIM-COSMIC F2 peak parameters determinations against the IRI(CCIR)," *Advances in Space Research*, Vol. 55, pp. 2012-2019, 2015.
- [11] L. Perna, K. Venkatesh, V.G. Pillat, M. Pezzopane, P.R. Fagundes, R.G. Ezquer, M.A. Cabrera, "Bottom side profiles for two close stations at the southern crest of the EIA: Differences and comparison with IRI-2012 and NeQuick2 for low and high solar activity," *Advances in Space Research*, Vol. 61, pp. 295-315, 2018.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายนิมิตร อินทร์สกุล
วัน เดือน ปีเกิด	1 มกราคม 2535
ที่อยู่	84/2 หมู่ 6 ตำบลม่วงค่อม อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี 15230
ประวัติผู้เขียน	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรออกแบบและปรับปรุงสัญญาณโทรศัพท์ บริษัท แอร์ คอนเนค เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) จำกัด พ.ศ. 2559 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	082-996-5446
อีเมล	nimit_i@en.rmutt.ac.th