

การเปรียบเทียบความถี่วิกฤตในชั้น E กับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณ
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้

COMPARISON OF E LAYER CRITICAL FREQUENCY WITH IRI-2016
MODEL OVER SOUTHEAST ASIA

ธนพร อยู่ประสพโชค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเปรียบเทียบความถี่วิกฤตในชั้น E กับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณ
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ธนพร อยู่ประสพโชค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบความถี่วิกฤตในชั้น E กับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณ
เอเชียตะวันออกเฉียงใต้

Comparison of E Layer Critical Frequency with IRI-2016 Model Over
Southeast Asia

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวธนพร อยู่ประสพโชค

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

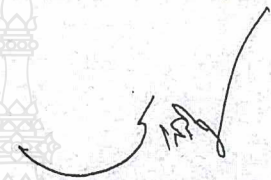
อาจารย์ที่ปรึกษา


ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.


ปีการศึกษา

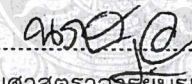
2563

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

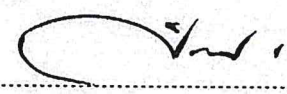

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ, D.Eng.)


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


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


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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต


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

วันที่ 19 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2564

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบความถี่วิกฤตในชั้น E กับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้
ชื่อ - นามสกุล	นางสาวธนพร อยู่ประสพโชค
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.
ปีการศึกษา	2563

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างความถี่วิกฤตในชั้น E (foE) ที่วัดได้กับแบบจำลอง IRI-2016 และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอย่างผิดปกติของปรากฏการณ์การแผ่ของชั้น E (foEs) ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กที่มีการไอออโนเซชันในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อย่างผิดปกติ ณ ทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ตัวแปร foE และ foEs ทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ 3 แห่ง ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ในประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ในประเทศอินโดนีเซีย ข้อมูลในทุก ๆ ชั่วโมงของตัวแปร foE และ foEs ตั้งแต่ปี พ.ศ.2553 ถึงปี พ.ศ. 2561 ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายฤดูกาล รายปี และความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์มีค่าสูงและต่ำ นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ค่าเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบน (%PD) ถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลอง

ผลที่ได้แสดงให้เห็น (1) ค่าของ foE ที่วัดได้กับที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI มีการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน กล่าวคือ foE มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงหลังจากพระอาทิตย์ขึ้นจนมีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลาเที่ยง จากนั้นจะมีค่าลดลงจนถึงพระอาทิตย์ตกดิน และจางหายไปในช่วงเวลากลางคืน โดยปกติค่า foE เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4 เมกะเฮิรตซ์ อย่างไรก็ตามแบบจำลอง IRI ทำนายค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงที่สถานีเชียงใหม่และชุมพร ในขณะที่สถานีโกโตตาบังค่าจากแบบจำลอง IRI มีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง นอกจากนี้ foE แปรผันตรงกับปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ ดังแสดงด้วยผลของ foE ในปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์มีค่าสูง (พ.ศ. 2558) จะมีค่าสูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ (พ.ศ. 2553) สำหรับทั้ง 3 สถานี การเปรียบเทียบระหว่างสถานีทั้ง 3 พบว่าสถานีโกโตตาบังมีค่า foE

สูงที่สุด ขณะที่สถานีเชียงใหม่มีค่าต่ำที่สุด (2) การเปลี่ยนแปลงของ foEs แสดงค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา
พระอาทิตย์ขึ้นและสามารถวัดค่าในเวลากลางคืนค่าที่วัดได้อยู่ระหว่าง 4 ถึง 8 เมกะเฮิรตซ์ โดยที่สถานี
ชุมพรมีค่า foEs สูงที่สุดในขณะที่สถานีโกโตตาบั้งมีค่าต่ำที่สุด นอกจากนี้ที่สถานีเชียงใหม่ในปี
ที่ปฏิบัติการจากดวงอาทิตย์มีค่าสูงมีค่า foEs สูงกว่าปีที่เกิดปฏิบัติการจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ ขณะที่
สถานีชุมพรและสถานีโกโตตาบั้งปีที่เกิดปฏิบัติการจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่า foEs สูงกว่าปีที่เกิดปฏิบัติการ
จากดวงอาทิตย์มีค่าสูง ทั้งนี้ข้อมูลจากงานวิจัยนี้มีส่วนช่วยในการออกแบบระบบการสื่อสารระยะไกลใน
ย่านความถี่สูง และถูกนำไปปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลอง IRI ต่อไป

คำสำคัญ : ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ไอโอโนซอนด์ แบบจำลอง IRI ปฏิบัติการจากดวงอาทิตย์



Thesis Title	Comparison of E Layer Critical Frequency with IRI-2016 Model Over Southeast Asia
Name–Surname	Miss Thanaporn Yooprasopchok
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Noraset Wichaipanich, D.Eng.
Academic Year	2020

ABSTRACT

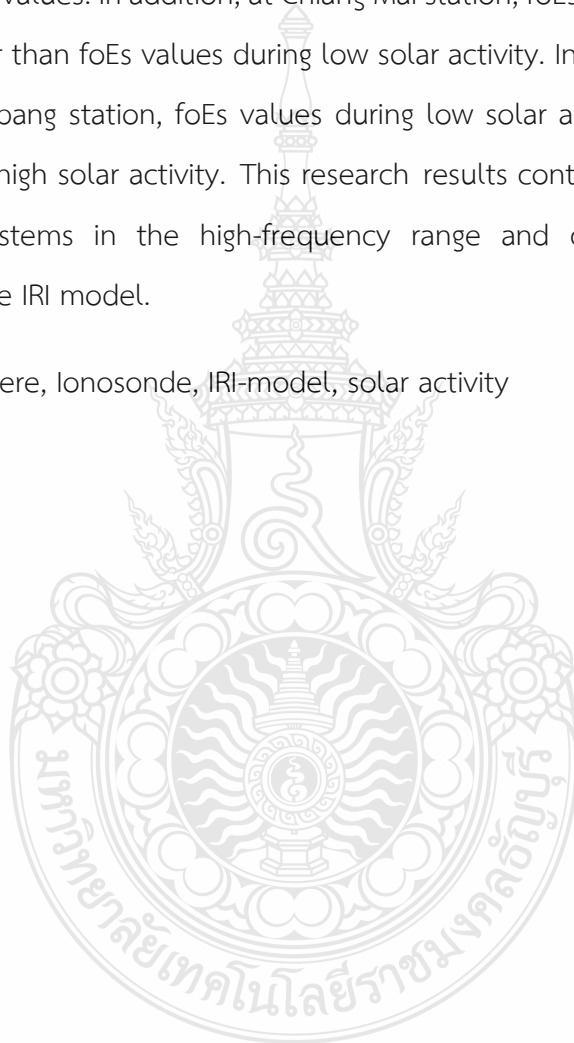
This thesis presented a comparison between the E layer critical frequency (foE) observations and the IRI-2016 model predictions. Moreover, the anomalous variations of sporadic-E (foEs) phenomenon at the equatorial ionization anomaly (EIA) over Southeast Asia were analyzed.

The foE and foEs parameters were collected from three ionosonde stations, namely Chiang Mai and Chumphon in Thailand, and Kototabang in Indonesia. The hourly values of foE and foEs variables from 2010 to 2018 were analyzed to find daily, seasonally, and yearly variations and differences between the low and high solar activities. Besides, the comparison between the observations and the IRI-2016 model predictions was proposed. The percentage deviation (%PD) was used to analyze the differences between the measured values and the model predicted values.

The results showed that: (1) both the observed foE values and the model predicted values similarly changed as they raised after the sunrise to the highest values at noon, and then decreased after noon to the lowest levels at sunset hours. In general, the foE values varied between 2 and 4 MHz. However, the IRI model predicted the higher foE values than the observed values, especially at Chiang Mai station and Chumphon station. On the other hand, the observed foE values were higher than the IRI model predicted values at Kototabang station. Furthermore, the foE values directly related to the solar activity, as the foE values during high solar activity (2015) were higher than

those during low solar activity (2010) at all stations. Comparing among these three stations, the highest values occurred at Kototabang station while the lowest values occurred at Chiang Mai station. (2) The changes of foEs values at all stations occurred during daytime. The measured values during nighttime were 4-8 MHz. Meanwhile, the Chumphon station showed the highest values of foEs while the Kototabang station showed the lowest values. In addition, at Chiang Mai station, foEs values during high solar activity were higher than foEs values during low solar activity. In contrast, at Chumphon station and Kototabang station, foEs values during low solar activity were higher than foEs values during high solar activity. This research results contributed to the design of communication systems in the high-frequency range and could be used in the development of the IRI model.

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



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลือและความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรเสฏฐ์ วิชัยพานิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่เสียสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนวคิด วิธีการ แก้ปัญหา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่อง จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เคนพันค้อ ประธานกรรมการสอบ และ กรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ และ ดร.วิเชียร อุปแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณาให้ ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติ (NICT) ประเทศญี่ปุ่น สำหรับอุปกรณ์และการสนับสนุนข้อมูลที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ เพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องและคณะอาจารย์ทุกท่านในภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่คอยสนับสนุนในการจัดทำ วิทยานิพนธ์เล่มนี้ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ หากผิดพลาด ประการใดผู้จัดทำขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ธนพร อยู่ประสพโชค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(5)
กิตติกรรมประกาศ.....	(7)
สารบัญ.....	(8)
สารบัญตาราง.....	(12)
สารบัญรูป.....	(13)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(17)
บทที่ 1 บทนำ.....	18
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	18
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	19
1.3 ขอบเขตการทำวิจัย.....	19
1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ.....	20
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย.....	21
2.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง.....	22
2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	22
2.3 วัฏจักรสุริยะ.....	24
2.4 การแบ่งฤดูกาล.....	26
2.5 เทคนิคไอโอโนซอนด์.....	28
2.6 แบบจำลอง IRI.....	30
บทที่ 3 วิธีศึกษาวิจัย.....	36
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.2 วิธีเก็บค่าพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม.....	39
3.2.1 การเก็บค่าพารามิเตอร์ foE.....	40

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การเก็บค่าพารามิเตอร์ foEs.....	42
3.3 วิธีการใช้โปรแกรม Special scaling.....	44
3.4 วิธีเก็บข้อมูล IRI.....	47
3.5 การวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม MATLAB.....	48
3.6 สรุป.....	52
บทที่ 4 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้นE.....	54
4.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่.....	54
4.1.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่แบบรายวัน.....	55
4.1.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่แบบรายเดือน.....	56
4.1.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มี ค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล.....	56
4.1.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI.....	59
4.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร.....	63
4.2.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรแบบรายวัน.....	63
4.2.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรแบบรายเดือน.....	64
4.2.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่า ต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล.....	64
4.2.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI.....	67
4.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่.....	70
4.3.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตบบังแบบรายวัน.....	70
4.3.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตบบังแบบรายเดือน.....	71
4.3.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตบบังปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มี ค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล.....	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตบบังเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI....	75
4.4	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE เปรียบเทียบบริเวณ EIA.....	79
บทที่ 5	การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น Es	81
5.1	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่.....	81
5.1.1	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่แบบรายเดือน.....	81
5.1.2	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล.....	82
5.1.3	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่.....	85
5.2	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพร.....	88
5.2.1	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพรแบบรายเดือน.....	88
5.2.2	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพรปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล.....	89
5.2.3	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพร.....	91
5.3	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตบบัง.....	94
5.3.1	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตบบังแบบรายเดือน.....	94
5.3.2	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตบบังปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล.....	95
5.3.3	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตบบัง.....	97
5.4	ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs เปรียบเทียบบริเวณ EIA.....	100
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	102
	บรรณานุกรม.....	104
	ภาคผนวก.....	108

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	109
ประวัติผู้เขียน.....	119



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เหตุการณ์สำคัญของการปรับปรุง IRI.....	31
ตารางที่ 2.2 การประชุมเชิงปฏิบัติการของ IRIและสิ่งตีพิมพ์ IRI	33
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ของการสังเกตโดยไอโอโนซอนเด สถานีชุมพร.....	37
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่.....	61
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่.....	62
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร.....	69
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร.....	70
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง.....	77
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง.....	78
ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่.....	86
ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่.....	87
ตารางที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร.....	92
ตารางที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร.....	92
ตารางที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตต้าง.....	98
ตารางที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตต้าง.....	99

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....22
รูปที่ 2.2	ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เวลากลางวันและกลางคืน.....23
รูปที่ 2.3	จุดดับบนดวงอาทิตย์.....24
รูปที่ 2.4	วัฏจักรสุริยะปี 1995-2020.....26
รูปที่ 2.5	แบ่งฤดูกาลโดยยึดตำแหน่งดวงอาทิตย์.....28
รูปที่ 2.6	ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคไอโอโน ซอนด์.....29
รูปที่ 2.7	พารามิเตอร์ที่อ่านได้จากไอโอโนแกรม.....29
รูปที่ 3.1	ตำแหน่งสถานีไอโอโนซอนด์.....36
รูปที่ 3.2	เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96029 FM/CW Radar.....38
รูปที่ 3.3	สายอากาศชนิดโพเตดัดไดโพล.....38
รูปที่ 3.4	ภาพจำลองพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม.....39
รูปที่ 3.5	ภาพไอโอแกรมในเวลาที่ยังไอโอโนสเฟียร์ปกติ.....40
รูปที่ 3.6	ภาพไอโอแกรมที่พารามิเตอร์ foE ไม่ปกติ.....40
รูปที่ 3.7	ภาพไอโอแกรมที่พารามิเตอร์ foE รูปทรงอื่นๆ.....41
รูปที่ 3.8	ภาพไอโอแกรมที่ปรากฏพารามิเตอร์ foE ในเวลากลางคืน.....41
รูปที่ 3.9	ภาพไอโอโนแกรมพารามิเตอร์ foEs.....42
รูปที่ 3.10	ภาพไอโอโนแกรมชั้น Es มากกว่า 1 ชั้น.....43
รูปที่ 3.11	ภาพไอโอโนแกรมพารามิเตอร์ foEs.....43
รูปที่ 3.12	ลักษณะโปรแกรม Special scaling.....44
รูปที่ 3.13	การเลือกค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs.....45
รูปที่ 3.14	การเลือกสถานีไอโอโนซอนด์ที่ต้องการเก็บค่าพารามิเตอร์.....45
รูปที่ 3.15	เลือก วัน เดือน ปี และเวลาที่ต้องการเก็บค่า.....46
รูปที่ 3.16	วัดค่า foE จากโปรแกรม Special scaling.....46
รูปที่ 3.17	วัดค่า foEs จากโปรแกรม Special scaling.....47

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.18 เว็บไซต์เก็บข้อมูล IRI	48
รูปที่ 3.19 คำสั่งโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์ผลรายปี.....	50
รูปที่ 3.20 ผลของ foE ทั้ง 3 สถานี.....	50
รูปที่ 3.21 คำสั่งโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์ผลรายเดือน.....	51
รูปที่ 3.22 ผลแบบกราฟเปรียบเทียบรายเดือน.....	51
รูปที่ 3.23 ผลแบบ Contour.....	52
รูปที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 20 มีนาคม 2016 สถานีเชียงใหม่.....	55
รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ foE เฉลี่ยรายเดือนปี 2010 สถานีเชียงใหม่.....	56
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำปี 2010 และปีที่ เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงปี 2015 สถานีเชียงใหม่.....	57
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำปี 2010 และปีที่ เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงปี 2015 แบบแบ่งฤดูกาล สถานีเชียงใหม่.....	58
รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (บน) IRI modal-2016 (กลาง)ผลต่าง(ล่าง) ที่ สถานีเชียงใหม่.....	60
รูปที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ที่สถานีเชียงใหม่.....	61
รูปที่ 4.7 พารามิเตอร์ foE วันที่ 21 มีนาคม 2016 สถานีชุมพร.....	63
รูปที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ foE เฉลี่ยรายเดือนปี 2010 สถานีชุมพร.....	64
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่ เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีชุมพร.....	66
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่ เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีชุมพร.....	66
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (บน) IRI modal-2016 (กลาง)ผลต่าง(ล่าง) ที่ สถานีชุมพร.....	67
รูปที่ 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ที่สถานีชุมพร.....	69
รูปที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 21 มีนาคม 2016 สถานีโกโตตาบัง.....	71
รูปที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ foE เฉลี่ยรายเดือนปี 2010 สถานีโกโตตาบัง.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีโกโตตาบัง.....	73
รูปที่ 4.16	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ (2010) และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง (2015) แบบแบ่งฤดูกาล สถานีโกโตตาบัง.....	74
รูปที่ 4.17	การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (บน) IRI-modal (กลาง) ผลต่าง(ล่าง) ที่สถานีโกโตตาบัง.....	75
รูปที่ 4.18	ค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ที่สถานีโกโตตาบัง.....	76
รูปที่ 4.19	พารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม (บน) พารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 (ล่าง).....	80
รูปที่ 5.1	ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 สถานีเชียงใหม่.....	82
รูปที่ 5.2	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีเชียงใหม่.....	83
รูปที่ 5.3	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีเชียงใหม่.....	85
รูปที่ 5.4	การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม สถานีเชียงใหม่.....	86
รูปที่ 5.5	ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 สถานีชุมพร.....	88
รูปที่ 5.6	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีชุมพร.....	89
รูปที่ 5.7	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีชุมพร.....	90
รูปที่ 5.8	การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม สถานีชุมพร.....	91
รูปที่ 5.9	ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 สถานีโกโตตาบัง.....	94
รูปที่ 5.10	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีโกโตตาบัง.....	96

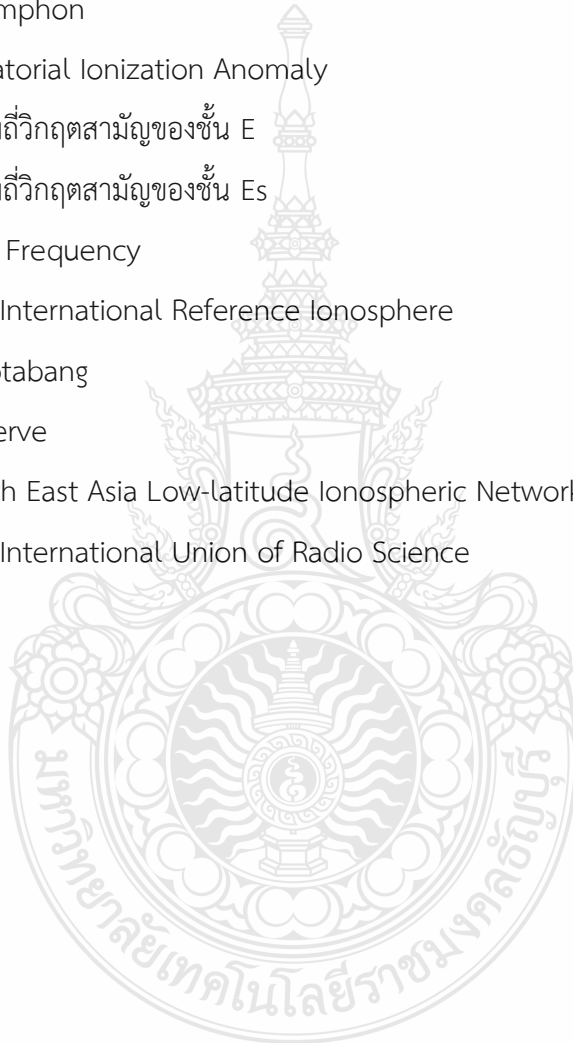
สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.11	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีโกโตตาบัง.....97
รูปที่ 5.12	การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม สถานีโกโตตาบัง.....98
รูปที่ 5.13	พารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม.....101



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CCIR	The International Radio Consultative Committee
CMU	Chiang Mai
COSPAR	Committee On SPACe Resrarch
CPN	Chumphon
EIA	Equatorial Ionization Anomaly
foE	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น E
foEs	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น Es
HF	High Frequency
IRI	The International Reference Ionosphere
KTB	Kototabang
Obs	Observe
SEALION	South East Asia Low-latitude Ionospheric Network
URSI	The International Union of Radio Science



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารได้แทรกแซงอยู่ในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทำให้มีการพัฒนาคิดค้นสิ่งอำนวยความสะดวกต่อการดำรงชีวิตมากขึ้น เทคโนโลยีได้เข้ามาเสริมปัจจัยพื้นฐานต่อการดำรงชีวิตเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ รวมถึงการให้บริการทางการข้อมูลและสื่อสารต่างๆ ด้วยกลไกอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ติดต่อสื่อสารกันได้สะดวก รวดเร็วมากยิ่งขึ้น ปฏิเสธไม่ได้ว่าเทคโนโลยีการสื่อสารส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้การสื่อสารแบบไร้สาย เช่น วิทยุ โทรศัพท์เคลื่อนที่ การส่งรับสัญญาณไมโครเวฟ เป็นต้น ทำให้เราสามารถติดต่อหรือเชื่อมต่อข้อมูลกันได้ในระยะไกล ตั้งแต่ในอดีตได้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารที่เริ่มใช้คลื่นวิทยุจนมาถึงในปัจจุบัน แรกเริ่มได้มีการค้นพบการสื่อสารทางไกลโดยคลื่นวิทยุสามารถสะท้อนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ ซึ่งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นอีกชั้นบรรยากาศที่สำคัญและเป็นชั้นบรรยากาศที่มีแตกตัวของไอออนเพราะได้รับอิทธิพลจากรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอ็กซ์จากดวงอาทิตย์จึงสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุจากความถี่ 3-30 เมกะเฮิร์ต ซึ่งการสะท้อนคลื่นวิทยุเกิดจากอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศทำหน้าที่คล้ายกระจกเงาสะท้อนคลื่นวิทยุกลับมายังผิวโลก อย่างไรก็ตามชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุได้ในความถี่ที่จำกัด ในกรณีที่คลื่นความถี่มากกว่าคลื่นความถี่ย่าน HF คลื่นจะทะลุผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไปโดยไม่สะท้อนกลับมายังผิวโลกได้ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้นได้แก่ชั้น D,E และ F ตามลำดับ ในปัจจุบันชั้นที่ใช้ในการสื่อสารโดยการสะท้อนคลื่นวิทยุมากที่สุดคือชั้น F เนื่องจากการสะสมของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศหนาแน่นที่สุดทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืนจึงทำให้การรับส่งสัญญาณมีประสิทธิภาพ ชั้นบรรยากาศ E เป็นชั้นบรรยากาศที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรองลงมาจากชั้นบรรยากาศ F การสะสมอิเล็กตรอนในชั้น E ชั้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในเวลากลางวัน และหายไปในเวลา กลางคืน การสะสมอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ E อาจเกิดผลกระทบต่อ การส่งสัญญาณ เนื่องจากการแพร่กระจายอิเล็กตรอนในชั้น E เกิดการผิดปกติ Sporadic-E จึงทำให้เกิดการรบกวนต่อการสะท้อนสัญญาณวิทยุในชั้นที่สูงกว่าชั้น E ได้

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปยังพารามิเตอร์ foE และ foEs ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ฤดูกาลและแต่ละสถานที่ ตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ ได้ทำการเก็บข้อมูลทั้งหมดสิ้น 3 สถานี ได้แก่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่ เดือนมกราคม พ.ศ.2553 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยจะทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ทั้ง 3 สถานีกับแบบจำลอง IRI-2016 และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รายชั่วโมง เปรียบเทียบแบบจำลอง IRI-2016

1.2.2 ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง รายฤดูกาล

1.2.3 ศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs บริเวณพื้นที่ EIA

1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

1.3.1 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs เก็บข้อมูลตั้งแต่ปี 2010 ถึง ปี 2018 จากสถานีไอโอโนซอนด์ 3 สถานีคือ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย

1.3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs รายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบแบบจำลอง IRI-2016

1.3.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพื่อนำไปเป็นข้อมูลปรับปรุงและประยุกต์การใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุคลื่นความถี่สูง
- 1.4.2 เพื่อนำไปเป็นข้อมูลปรับปรุงการใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุ
- 1.4.3 นำผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลไปปรับปรุงและพัฒนาฐานข้อมูลของแบบจำลอง IRI



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย การแบ่งและลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ พารามิเตอร์ foE, foEs วัฏจักรสุริยะ แบบจำลอง IRI Model-2016 เทคนิคไอโอโนซอนด์ การแบ่งฤดูกาล

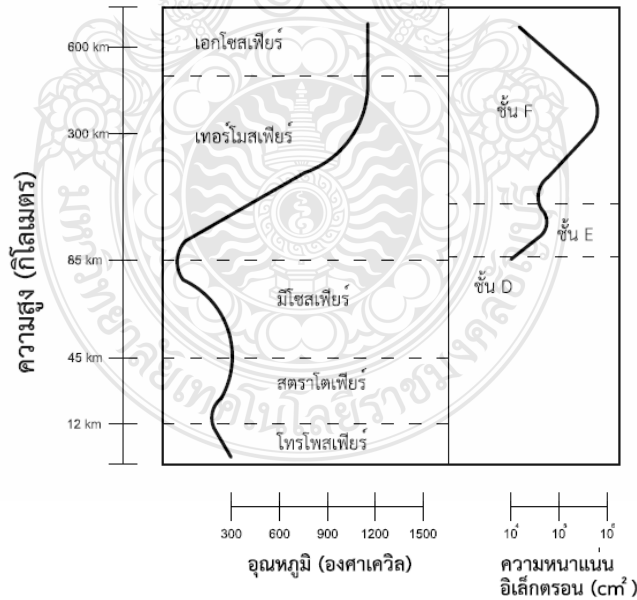
2.1 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง

นักวิทยาศาสตร์ได้แบ่งชั้นบรรยากาศออกเป็น 5 ชั้น ได้แก่ ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) เป็นชั้นบรรยากาศชั้นล่างสุด ห่างจากพื้นดินขึ้นไปประมาณ 10 กิโลเมตร หรือ 33,000 ฟุต เป็นชั้นที่มีมนุษย์อาศัยอยู่ มีลักษณะเด่นคือ อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามความสูง โดยอุณหภูมิลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ยิ่งสูงขึ้น อุณหภูมิจะยิ่งลดต่ำลงในอัตรา 6.5°C ต่อ 1 กิโลเมตร จนกระทั่งความสูงประมาณ 12 กิโลเมตร อุณหภูมิจะคงที่ประมาณ -60°C นอกจากนี้ชั้นโทรโพสเฟียร์ยังมีไอน้ำมาก ทำให้มีสภาพอากาศรุนแรงและแปรปรวน มีเมฆมาก เกิดพายุ และฝนบ่อยครั้ง ชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ (Stratosphere) เป็นชั้นถัดจากโทรโพสเฟียร์ มีความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร จากพื้นดิน มีอากาศเบาบาง ไม่มีเมฆและพายุ มีเพียงความชื้นและผงฝุ่น มีปริมาณความเข้มข้นของโอโซนมาก โอโซนจะช่วยดูดกลืนรังสี UV จากดวงอาทิตย์ ไม่ให้ส่องมายังพื้นผิวโลกมากเกินไป นอกจากนี้เครื่องบินเจ็ตยังนิยมบินช่วงรอยต่อระหว่างชั้นโทรโพสเฟียร์และสตราโทสเฟียร์ เนื่องจากสภาพอากาศนิ่งสงบ ชั้นบรรยากาศมีโซสเฟียร์ (Mesosphere) อยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 85 กิโลเมตร อุกกาบาตที่พุ่งเข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลกส่วนใหญ่จะถูกเผาไหม้ในชั้นนี้ ขณะที่อุณหภูมิลดลงตามความสูง ยิ่งสูงขึ้นจะยิ่งหนาว และหนาวที่สุดประมาณ -90°C โดยพบบริเวณช่วงบนของบรรยากาศชั้นนี้ นอกจากนี้ยังมีอากาศที่เบาบางมากอีกด้วย ชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere) อยู่ถัดจากชั้นมีโซสเฟียร์ขึ้นไป มีความสูงจากพื้นดินประมาณ 85-500 กิโลเมตร อุณหภูมิในชั้นนี้จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จนถึงระดับ 100 กิโลเมตร เนื่องจากอยู่ใกล้ดวงอาทิตย์มากกว่า 3 ชั้นแรก และจากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลง โดยอุณหภูมิตั้งแต่ชั้นบนของเทอร์โมสเฟียร์ (Upper Thermosphere) จะอยู่ที่ $500-2,000^{\circ}\text{C}$ อากาศในชั้นนี้มีแก๊สชนิดต่างๆ ที่เป็นประจุไฟฟ้า เรียกว่า ไอออน ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นวิทยุบางชนิด มีประโยชน์ในการสื่อสาร และกรองรังสีต่างๆ ที่มาจากนอกโลกได้ เช่น รังสีเอกซ์ รังสี UV นอกจากนี้ดาวเทียมจำนวนมากยังโคจรรอบโลกอยู่ในชั้น

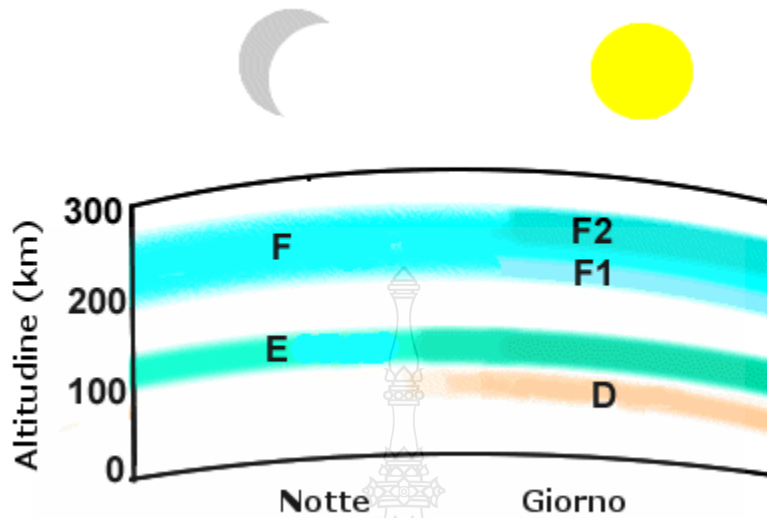
นี้ด้วย ชั้นบรรยากาศเอกโซสเฟียร์ (Exosphere) เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่สูงจากผิวโลกตั้งแต่ 500 กิโลเมตรขึ้นไป ไม่มีขอบเขตชัดเจนระหว่างบรรยากาศและอวกาศ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจนและฮีเลียม

2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีอากาศเบาบางมากแต่เป็นชั้นหลักที่ช่วยดูดซับรังสี UV จากดวงอาทิตย์ อนุภาคในชั้นนี้เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่เรียกว่า "ไอออน" ที่เกิดจากการแตกตัวเมื่ออนุภาคในสภาวะปกติถูกกระตุ้นด้วยรังสี UV จากดวงอาทิตย์ จะเกิดการแตกตัวของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีคุณสมบัติสะท้อนคลื่นวิทยุได้ จึงเป็นชั้นที่ใช้ส่งสัญญาณวิทยุสื่อสารที่ความถี่ต่ำกว่าย่าน HF การแตกตัวของไอออนนี้เรียกว่าขบวนการไอออไนเซชัน (ionization) เกิดจากการที่อะตอมของก๊าซออกซิเจนทำปฏิกิริยากับแสงอาทิตย์จะเกิดการแยกตัวของไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งขบวนการเกิดไอออไนเซชันแต่ละช่วงเวลาจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงอาทิตย์และสภาวะความพร้อมที่จะทำให้เกิดการแตกตัวของไอออน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบ่งออกเป็น 3 ชั้น คือ ชั้น D, E และ F ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [23]



รูปที่ 2.2 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เวลากลางวันและกลางคืน [31]

ชั้นบรรยากาศ D มีความสูงอยู่ที่ 50-90 กิโลเมตร เกิดจากแสงของดวงอาทิตย์ทำให้ก๊าซไนตริกออกไซด์กลายเป็นประจุไฟฟ้า จะพบเห็นในเวลากลางวันและจะหายไปในช่วงกลางคืน เนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ของอนุภาคมีค่าสูงสุด มีค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์จะมีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน เป็นชั้นที่มีบทบาทต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ

ชั้นบรรยากาศ E อยู่ที่ความสูง 90-140 กิโลเมตร พบเห็นได้ในตอนกลางวันจะมีการไอออไนซ์มากกว่าตอนกลางคืนเนื่องจากการเกิดไอออไนซ์ต้องอาศัยแสงอาทิตย์ เป็นชั้นที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากที่สุดที่ระดับความสูง 110 กิโลเมตร ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นตามปฏิกิริยาของดวงอาทิตย์ โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนช่วงเวลากลางวันอยู่ที่ประมาณ 10^5 ถึง 4.5×10^5 eL/m³ และช่วงเวลากลางคืนค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอยู่ที่ 5×10^5 eL/m³ ชั้นบรรยากาศ E มีความสำคัญต่อการสื่อสารวิทยุเนื่องจากเป็นชั้นที่สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุในย่าน High Frequency (ความถี่ระหว่าง 3-30 เมกะเฮิร์ต) foE คือ ความถี่วิกฤตของชั้น E (foE) เป็นความถี่สุดท้ายที่คลื่นวิทยุกระทบอิเล็กตรอนที่ชั้นบรรยากาศ E ที่สามารถสะท้อนกลับมายังเครื่องรับคลื่นวิทยุได้ แต่อาจมีความผิดปกติเกิดขึ้นในชั้น E อันเนื่องมาจากการสอดแทรกคลื่นที่มีความถี่สูงหรือปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ความผิดปกติในชั้น E นี้เรียกว่า

Sporadic-E (Es) ชั้น Es เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้นและบางมาก การเกิดขึ้นของชั้น Es และความเข้มของการไอออไนซ์จะไม่มีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ความผิดปกตินี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งกลางวันและกลางคืนในทุกฤดูกาล และไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้ ชั้น Es มีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงกว่าชั้น E ปกติถึง 10 เท่า เป็นชั้นที่บางมากแต่มีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูง และจะปรากฏที่ความสูง 90-120 กิโลเมตร ซึ่งชั้น Es นี้มีความสำคัญในการสะท้อนคลื่นวิทยุความถี่ต่ำกว่า 100 MHz

จากการศึกษาได้พบว่ามีการวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์ foE และ foEs กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ในพื้นที่ต่างๆ ในปีที่เกิดปรากฏการณ์วัฏจักรสุริยะหรือการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์กับแบบจำลอง International Reference Ionosphere

ชั้นบรรยากาศ F อยู่ที่ความสูง 140-300 กิโลเมตร เป็นชั้นที่มีการไอออไนซ์มากที่สุดและเป็นเพียงชั้นบรรยากาศเดียวที่เกิดไอออไนซ์ไม่ขึ้นกับวันเวลาหรือฤดูกาล ชั้น F เป็นชั้นที่อำนวยความสะดวกแพร่กระจายคลื่นวิทยุทางไกลแม้ในเวลากลางคืน เพราะ ชั้น F เป็นชั้นบนสุดในเวลากลางคืนมีการไอออไนซ์สูงมาก ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์หลงเหลืออยู่แม้ไม่ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์ก็ตาม ในช่วงเวลากลางวันชั้น F จะแยกตัวออกเป็น 2 ชั้น คือ F1 และ F2 แต่ในเวลากลางคืนจะรวมตัวกันเหลือแค่ชั้น F ดังรูปที่ 2.2 ชั้นบรรยากาศทั้ง 3 ชั้นมีบทบาทต่อการรับส่งคลื่นวิทยุที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นตัวสะท้อนคลื่นวิทยุนั้นเอง [23]

2.3 วัฏจักรสุริยะ

วัฏจักรสุริยะก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเกิดไอออไนซ์ในชั้นบรรยากาศ เกิดจากจุดดับบนดวงอาทิตย์ที่หมุนรอบไปตามการหมุนของดวงอาทิตย์ ถูกกำหนดด้วยความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.4 เทสลา (4,000 G) และจุดดำนี้จะเกิดเป็นคู่อันที่มีขั้วตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการไหลเวียนของสนามแม่เหล็กบริเวณผิวของดวงอาทิตย์ โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มีลักษณะเป็นคาบ (Solar cycle) ซึ่งจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ มีลักษณะเป็นจุดดำมีขนาดเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับการรวมตัวกัน หากพิจารณาที่จุดดำจะพบว่ามีลักษณะซ้อนกัน 2 ชั้น ชั้นใน (Umbra) จะเป็นสีดำเข้ม ส่วนชั้นนอก (Penumbra) จะมีลักษณะที่จางกว่าชั้นใน บริเวณจุดดำชั้นนอกเป็นบริเวณที่มีการไหลเวียนของแก๊สจากจุดดำชั้นในไปยังบริเวณจุดดำชั้นนอก เมื่อแก๊สไหลผ่านออกจากจุดดำชั้นนอกจะเปลี่ยนทิศพุ่งขึ้นตั้งฉากกับผิวของดวงอาทิตย์ หลังจากนั้นจะย้อนพุ่งเข้ากลับจุดดำชั้นในเป็นวัฏจักรต่อไป ดังรูปที่ 2.3

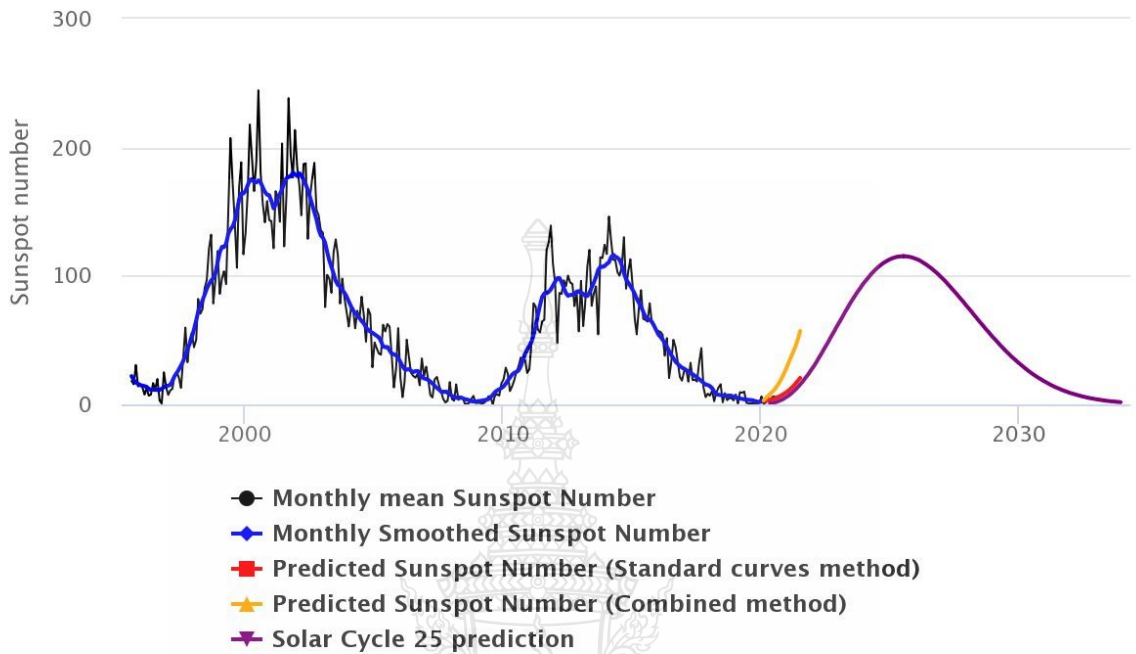


รูปที่ 2.3 จุดดับบนดวงอาทิตย์ [30]

เนื่องจากจุดดับบนดวงอาทิตย์ไม่ได้เกิดขึ้นตลอดเวลา บางช่วงเวลาอาจเกิดจุดดำขึ้นเป็นจำนวนมากแต่บางช่วงเวลาอาจไม่มีเลยแม้แต่จุดเดียว การเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เป็นวัฏจักร มีคาบเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 8 ปี ถึง 16 ปี มีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงประมาณ 11.1 ปี คาบการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า วัฏจักรของดวงอาทิตย์ (Solar cycle) หรือวัฏจักรของจุดดำ (Sunspot cycle) ถ้านำข้อมูลการเกิดจุดดับบนดวงอาทิตย์มาเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์กับเวลา จะได้รูปรกราฟที่ได้คล้ายกับคลื่นรูปฟันเลื่อย โดยช่วงขึ้นจะชันกว่าช่วงลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2.4

จากการสำรวจดวงอาทิตย์ของนักดาราศาสตร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน นักดาราศาสตร์ยังได้พบว่า ปรากฏวัฏจักรที่ยาวประมาณ 80 ปีซ้อนอยู่บนคาบ 11.1 ปีนี้อีกด้วย นอกจากนี้วัฏจักรของจุดดับบนดวงอาทิตย์ก็ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอมาตลอด ในปี ค.ศ. 1645 ถึง 1715 วัฏจักรของดวงอาทิตย์ได้หยุดชะงักไปนานถึง 70 ปี เป็นช่วงที่รู้จักกันในชื่อของ ช่วงต่ำสุดมอนเดอร์ (Maunder minimum) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวแทบจะไม่มีจุดดำเกิดขึ้นเลย [23]

Solar Cycle progression – Sunspot number



WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels

รูปที่ 2.4 วัฏจักรสุริยะปี 1995-2020 [22]

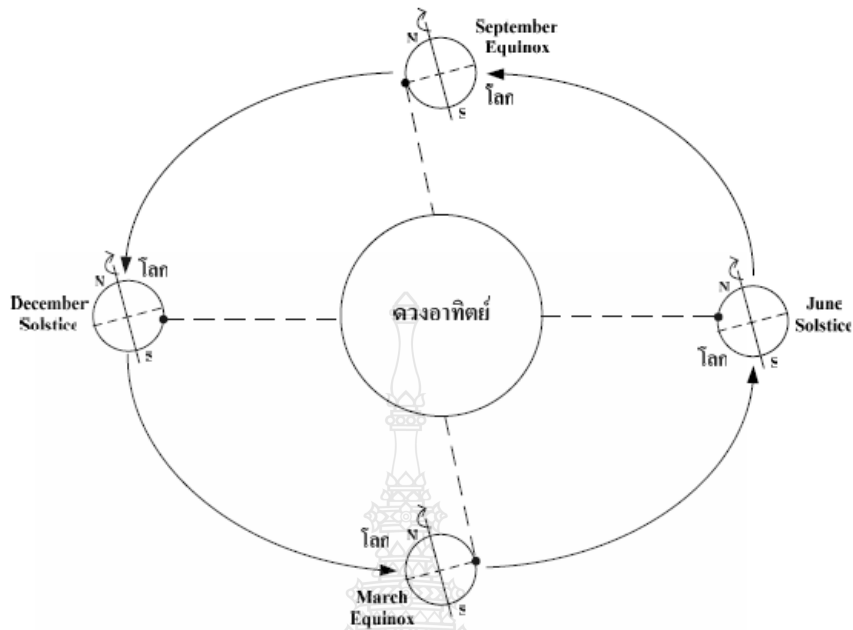
การเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ของสุริยะมีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งสิ้น กล่าวได้ว่าความเข้มของแสงอาทิตย์มีผลต่อค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศและส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศย่อยในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ปฏิกริยาของดวงอาทิตย์จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงกับชั้น E และ Es

2.4 การแบ่งฤดูกาล

ฤดูกาลเกิดขึ้นจากการโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลก โลกจะเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ขณะเดียวกันโลกก็หมุนรอบตัวเอง โดยหมุนจากตะวันออกไปตะวันตก โดยที่แกนของโลกเอียงทำมุม 23 1/2 องศาตลอดเวลา การโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลกทำให้บริเวณต่าง ๆ ได้รับแสงสว่างและความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดฤดูกาลสับกันไปในเวลา 1 ปี หรือ 365 วัน เมื่อรอบโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ครบ 1 รอบ

โลกของเราจะหมุนรอบตัวเองใช้เวลา 1 วัน ในขณะที่หมุนรอบตัวเองนั้น ก็จะหมุนรอบดวงอาทิตย์ด้วยซึ่งใช้เวลา 365 วัน ในการหมุนรอบดวงอาทิตย์ 1 รอบ แกนของโลกเรานั้นไม่ได้ตั้งตรง แต่จะเอียงทำมุมกับวงโคจรของมันเอง ด้วยเหตุนี้ในขณะที่โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์อยู่ตามวงโคจรนั้น เมื่อโลกโคจรไปอยู่ในตำแหน่งแต่ละแห่ง ส่วนของโลกที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์จะใช้เวลาที่แตกต่างกัน และนี่ก็คือสาเหตุที่ทำให้เกิดฤดูกาลขึ้นมา เช่น ในฤดูร้อนส่วนของโลกที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์จะเป็นช่วงที่ยาวที่สุด (กลางวันนาน) และในเวลากลางวันน้อยที่สุด ส่วนฤดูใบไม้ร่วงกลางวันจะยาว กลางวันจะสั้นที่สุดในเขตขั้วและเขตหนาว จะแบ่งออกเป็น 4 ฤดู ได้แก่

1. March Equinox (กุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน) หรือ วสันตวิษุวัต (อีควินอกซ์ฤดูใบไม้ผลิ) ประมาณวันที่ 20 - 21 มีนาคม ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออก และตกทางทิศตะวันตกพอดี ทำให้กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน พอเข้าสู่ฤดูหนาว ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในซีกฟ้าเหนือมากขึ้นได้แต่ละวัน
2. June Solstice (พฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม) หรือ ครีษมายัน (โซลสทิสฤดูร้อน) ประมาณวันที่ 20 - 21 มิถุนายน ดวงอาทิตย์อยู่ค่อนไปทางทิศเหนือมากที่สุด ดวงอาทิตย์ขึ้นเร็วและตกช้า ทำให้ซีกโลกเหนือกลางวันยาวนานกว่ากลางคืน หลังจากนั้นดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปทางเส้นศูนย์สูตรฟ้า
3. September Equinox (สิงหาคม กันยายน ตุลาคม) หรือ ศารทวิษุวัต (อีควินอกซ์ฤดูใบไม้ร่วง) ประมาณวันที่ 22 - 23 กันยายน ดวงอาทิตย์จะขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดีอีกครั้ง กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน พอเข้าสู่ฤดูหนาว ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในซีกฟ้าใต้มากขึ้นในแต่ละวัน
4. December Solstice (พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม) หรือ เหมายัน (โซลสทิสฤดูหนาว) ประมาณวันที่ 20 - 21 ธันวาคม ดวงอาทิตย์อยู่ค่อนไปทางทิศใต้มากที่สุด ดวงอาทิตย์ขึ้นช้าและตกเร็ว ทำให้ซีกโลกเหนือกลางวันยาวนานกว่ากลางวัน หลังจากนั้นดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่กลับมายังเส้นศูนย์สูตรฟ้าอีกครั้ง

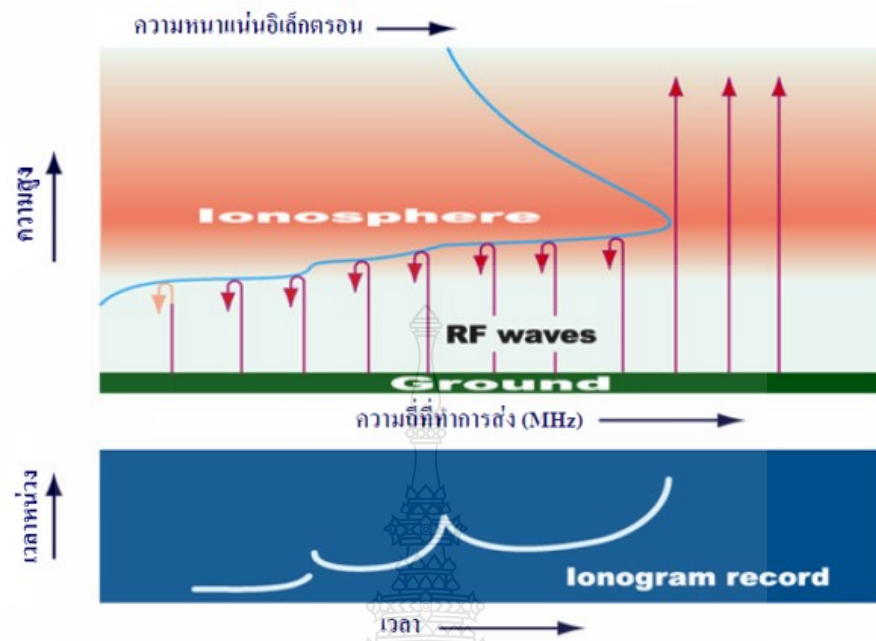


รูปที่ 2.5 แบ่งฤดูกาลโดยยึดตำแหน่งดวงอาทิตย์ [24]

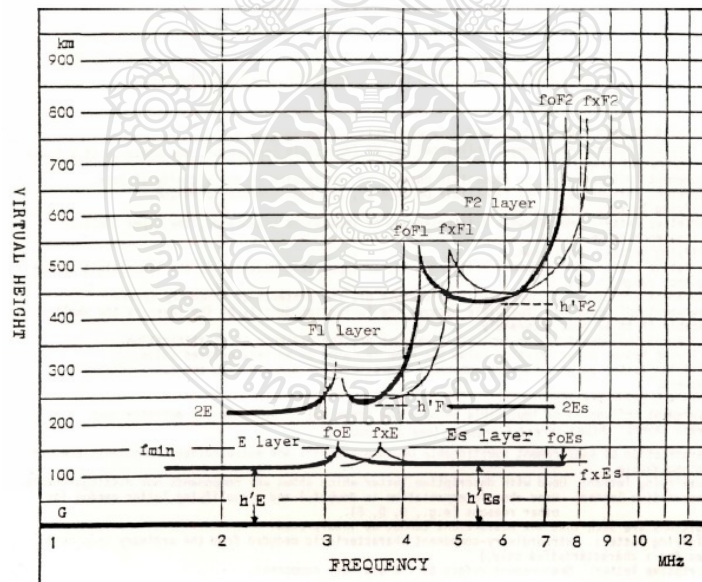
2.5 เทคนิคไอโอโนซอนด์

เทคนิคไอโอโนซอนด์ หรือ Ionospheric sounder เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยมีหลักการคล้ายกับเรดาร์คือ การคำนวณระยะของตำแหน่งวัตถุจากการสะท้อนของคลื่นที่ส่งออกไป โดยเทคนิคไอโอโนซอนด์จะใช้ย่านความถี่ HF (High Frequency) สามารถรับคลื่นสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มายังสายอากาศรับได้ในช่วงความถี่ 2-30 เมกะเฮิรตซ์ โดยการส่งและรับคลื่น

จะเกิดอย่างต่อเนื่อง การมอดูเลชันจะใช้เทคนิคการมอดูเลชันคลื่นอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มความถี่แบบเชิงเส้นตามเวลาคลื่นที่ส่งขึ้นไปจะไปสะท้อนกับอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กลับลงมายังสายอากาศรับดังรูปที่ 2.6 และส่งวางกันเป็นรูปกากบาทกันเป็นโดม หลังจากนั้นจะคำนวณเวลาหน่วงในการเดินทางของคลื่น และทำการพลอตภาพเป็นไอโอโนแกรม



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคไอโอโนซอนด์ [28]



รูปที่ 2.7 พารามิเตอร์ที่อ่านได้จากไอโอโนแกรม [2]

ไอโอโนแกรม (Ionogram) คือรูปที่ใช้แสดงการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเทคนิคไอโอโนซอนเด ไอโอโนแกรมสามารถแบ่งวิธีการวัดได้ 2 วิธีคือ วิธีที่ทำการวัดจากข้างล่างขึ้นข้างบน (Bottomside) และวิธีการวัดจากข้างบนลงข้างล่าง (Topside) ซึ่งวิธีส่วนมากที่ใช้กันเป็น bottomside คือจะส่งคลื่นความถี่ 2-30 เมกะเฮิรตซ์ ขึ้นไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศและคำนวณค่าหน่วงเวลา เช่นเดียวกับ Topside แต่จะเป็นยังส่งคลื่นความถี่จากดาวเทียมแทน ซึ่งไอโอโนแกรมใช้ในการบ่งบอกโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเราสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังรูปที่ 2.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้จากไอโอโนแกรม โดยชั้น E จะประกอบไปด้วยตัวแปร ดังนี้ ความสูงของชั้น E ($h'E$), ความสูงของชั้น Es ($h'Es$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น E ($foEs$) และความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น E (fxE) ในชั้น F จะประกอบด้วยตัวแปรดังนี้ ความสูงชั้น F ($h'F$), ความสูงชั้น F2 ($h'F2$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F1 ($foF1$), ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F1 ($fxF1$), ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F2 ($foF2$), และความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F2 ($fxF2$) โดยชั้น E และ F1 จะเห็นได้ชัดในเวลากลางวัน ส่วนชั้น D เป็นชั้นที่มีค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำจึงไม่สามารถอ่านค่าสะท้อนจากไอโอโนแกรมได้

2.6 แบบจำลอง IRI

IRI model (International Reference Ionosphere) คือแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และอุณหภูมิของชั้นต่างๆ โดย IRI ได้รับการรับรองเป็นมาตรฐานสากลใช้กันอย่างแพร่หลายและยังใช้ในด้านการศึกษาและวิศวกรรม แบบจำลอง IRI สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามความแตกต่างของชุดคำสั่ง คือแบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Radio Consultative Committee (CCIR,1966) และแบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Union of Radio Science (URSI,1989) แบบจำลอง IRI ได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง โดย IRI ได้ถูกรับรองเป็นมาตรฐานสากลโดย the Committee On SPACe Research (COSPAR) และ International Union of Radio Science (URSI) โดย Szuszczewics และคณะได้ทำการพัฒนาจนได้แบบจำลอง IRI ที่สมบูรณ์ที่สุดในปี ค.ศ. 1999 URSI ได้รับรองให้แบบจำลอง IRI เป็นมาตรฐานสากลสำหรับชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [23]

การรวมกลุ่มของ COSPAR และ URSI ประกอบไปด้วยทีมผู้เชี่ยวชาญเพื่อทำการอธิบายความแตกต่างในแต่ละประเทศ ความแตกต่างในแต่ละเทคนิคที่ทำการวัด และความแตกต่างของปัญหาที่เกิดจากแบบจำลอง โดยปัจจุบันมีทะเบียนรายชื่อของคณะสมาชิกทั้งหมด 43 คณะ ที่แพร่กระจายทั่วโลกของการรวมกลุ่มระหว่าง COSPAR และ URSI บนแบบจำลอง IRI แบบจำลองมีการปรับปรุงแก้ไขอย่างต่อเนื่อง แบบจำลอง IRI ที่ปรับปรุงข้อมูลครั้งล่าสุดคือ IRI-2016 โดยระหว่างปรับปรุงได้มีเหตุการณ์สำคัญต่างๆแสดงในตาราง 2.1 และยังมีการจัดประชุมเชิงวิชาการแสดงดังตาราง 2.2 เพื่อแลกเปลี่ยนความเห็นและปรับปรุงแบบจำลอง โดยมีสิ่งพิมพ์การประชุมเชิงปฏิบัติการลงตีพิมพ์ครั้งแรกในหนังสือ Space Research และต่อมาใน Advance in Space Research

ตารางที่ 2.1 เหตุการณ์สำคัญของการปรับปรุง IRI [23]

ปี (ค.ศ.)	เหตุการณ์	รายละเอียด	สื่อกลาง
1968	COSPAR ก่อตั้ง IRI WG	โดยมี Karl Rower ดำรงตำแหน่งประธาน	
1969	URSI เข้าร่วมกลุ่ม		
1972	ทำการสร้างตารางในขั้นต้น	ตัวแปรต่างๆของ IRI ในแต่ละสถานที่ที่เลือก	รายงาน
1973	COSPAR จัดประชุมสัมมนาที่ Konstanz ประเทศเยอรมนี	แนะนำข้อมูลที่ต้องใช้สำหรับแบบจำลองของชั้น D	
1978	รายงานพิเศษของ URSI (IRI-79)	การครอบคลุมทั่วโลกสำหรับความหนาแน่นแผ่นที่ของ CCIR สำหรับ foE, foF1, foF2 และ M(3000)F2	รายงานรหัส ALGOL และ FORTRAN บนแถบบันทึกเสียงและบัตรรายการ
1981	ศูนย์กลางข้อมูลทั่วโลกสำหรับรายงานทางฟิสิกส์เกี่ยวกับดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อโลก (IRI-79)		กราฟและตารางตัวแปรต่างๆ ของ IRI

ตารางที่ 2.1 เหตุการณ์สำคัญของการปรับปรุง IRI [ต่อ]

ปี (ค.ศ.)	เหตุการณ์	รายละเอียด	สื่อกลาง
1986	IRI-86 บนแผ่นดิสก์สำหรับใช้บนคอมพิวเตอร์ส่วนตัว	ครอบคลุมทั่วโลกสำหรับอุณหภูมิที่ตั้งอยู่บน AE-C, D, -E และข้อมูล AEROS-A, -B	แผ่นดิสก์เกี่ยวกับโปรแกรมทำงานของ DOS
1990	รายงานของ National Space Science Data Center (NSSDC)	แผนที่ URSI สำหรับ foF2	การกู้ข้อมูลจากเอกสารสำคัญของ NSSDC ด้วยวิธี ftp นิรนามและใช้ประโยชน์สำหรับการเชื่อมต่อการคำนวณในส่วนของออนไลน์ ข้อมูลของ NSSDC และบริการข่าวสาร (NODIS)
1995	IRI-95 ออนไลน์(IRI Web)	การปรับปรุงที่ละติจูดแม่เหล็กต่ำ	IRI-Web ทำการคำนวณและพล็อตตัวแปรต่างๆของ IRI บนอินเทอร์เน็ต
1999	มติของ URSI	IRI ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานสากลสำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์	
2001	IRI-2001 เกี่ยวกับการปรับปรุงต่างๆและตัวแปรใหม่	การปรับปรุงชั้น D และ F1 รวมถึงพายุและแบบจำลองจักรวาลตัวแปรใหม่ได้แก่ F1, prob, equat,vert, iondrift	

ตารางที่ 2.2 การประชุมเชิงปฏิบัติการของ IRI และสิ่งตีพิมพ์ IRI [23]

ปี (ค.ศ.)	สถานที่จัด	หัวข้อ	สิ่งตีพิมพ์
1971 ⁺	Seattle, USA		Space Res. XII, 1229-1335, 1972
1973	Konstanz, FRG	Measurements and Results of Lower Ionosphere	Akademie-Verlag, Berlin, 1974
1974 ⁺	Sao Paulo, Brazil		Space Res. XV, 295-334, 1975
1980 ⁺	Budapest, Hungary	IRI-79	WDC-A-STP,UAG-90, 1984
1982 ⁺	Ottawa, Canada	The Upper Atmosphere of the earth and planets	Adv.Space Res.(ASR) 2(10) 1982
1983	Stara Zagora, Bulgaria	Towards an improve IRI	(ASR) 4(1) 1984
1984 ⁺	Graz, Austria	Models of the atmosphere and Ionosphere	(ASR) 5(7) 1985
1985	Louvain, Belgium	IRI – status 1985/86	(ASR) 5(10) 1985
1987	Novgorod, Russia	Ionosphere Informatics	(ASR) 8(4) 1988
1988 ⁺	Espoo, Finland	Ionosphere Informatics and Empirical Modeling	(ASR) 10(8) 1990
1989	Abingdon, UK	Development of IRI-90	(ASR) 10(11) 1990
1990 ⁺	The Hague, Netherland	Enlarged Space and Ground data base for	(ASR) 11(10) 1991
1991	Athens, Greece	Adv. In Global/Reg. Descript. Of Ionospheric Parameter	(ASR) 12(7) 1992

ตารางที่ 2.2 การประชุมเชิงปฏิบัติการของ IRI และสิ่งตีพิมพ์ IRI [ต่อ]

ปี (ค.ศ.)	สถานที่จัด	หัวข้อ	สิ่งตีพิมพ์
1992 ⁺	Washington, DC, USA	Ionospheric Models	(ASR) 13(3) 1993
1993	Trieste, Italy	Off Median Phenomena and IRI	(ASR) 14(12) 1994
1994 ⁺	Hamburg, FRG	The High Latitudes in the IRI	(ASR) 16(1) 1995
1995	New Delhi, India	Low and Equat. Latitude in IRI	(ASR) 18(6) 1996
1996 ⁺	Birmingham, UK	Descript. Of Ionospheric Strom Effects and Irregularities	(ASR) 20(9) 1997
1997	Kuhlungsborn, Germany	New Develops. In Ionospheric Modeling and Prediction	(ASR) 22(6) 1998
1998 ⁺	Nagoya, Japan	Lower Ionosphere: Measurements and Models	(ASR) 25(1) 2000
1999	Lowell, MA, USA	IRI- Workshop 1999	(ASR) 27(1) 2001
2000 ⁺	Warsaw, Poland	Modeling the Topside Ionosphere and Plasmasphere	(ASR) 29(6) 2002
2001	Soa Jose Dos Campos, Brazil	Description of the Low Latitude Ionosphere in the IRI	(ASR) 31(3) 2003
2002 ⁺	Houston, Texas, USA	Improved Ionosphere Specification and Forecast	ASR in press
2003	Grahamstown, South Africa	Quantifying ionospheric variability	ASR in preparation

⁺ แสดงการประชุมของ IRI ในช่วงการรวมกลุ่มของคณะกรรมการบน Space Research

การปรับปรุงแบบจำลอง IRI อาศัยการเก็บข้อมูลตามสถานีต่างๆ บนโลกมาประมวลผลออกมาเป็นแบบจำลอง ซึ่งมีงานวิจัยมากมายเป็นตัวสนับสนุนในการพัฒนาแบบจำลอง พารามิเตอร์ foE ก็เช่นเดียวกัน จากงานวิจัย [19] จะเห็นได้ว่า แบบจำลอง IRI จะหาค่าพารามิเตอร์ foE ได้จากสมการ

$$foE = 0.121 + 0.0015 \times (COV_{12} - 66) \quad (2.1)$$

$$COV_{12} = 63.75 + 0.728 \times RSSN + 0.00089 \times RSSN^2 \quad (2.2)$$

โดยที่ RSSN คือจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์แบบเรียบ 12 เดือน ซึ่งเป็นข้อมูลที่บันทึกไว้ใช้ใน IRI และยังสามารถหาค่า RSSN ได้จาก

$$RSSN = [(-0.728 \pm \sqrt{0.728^2 - 4 \times 0.00089 \times (63.75 - COV_{12})}) / 2 \times 0.00089] \quad (2.3)$$

เราสามารถหาค่า COV_{12} คำนวณหาค่า RSSN และใช้เป็นข้อมูลสำหรับ IRI ได้

โดยข้อมูลจากแบบจำลอง IRI ที่ได้ปรับปรุงขึ้นนอกจากพารามิเตอร์ foE แล้ว ยังมีค่าพารามิเตอร์อื่นอีก เช่น hmD, NmD, foD, hmF1, NmF1, foF1, hmF2, M(3000)F2, NmF2, สามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้จากเว็บไซต์ [29]

บทที่ 3

วิธีศึกษาวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงเวลาต่างๆ ได้ทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ 3 สถานี ได้แก่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก ดังรูป 3.1 การเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องส่งและรับคลื่นวิทยุย่าน HF ผ่านสายอากาศและรับคลื่นที่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับและเก็บข้อมูลเป็นภาพ



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งสถานีไอโอโนซอนด์ [26]

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

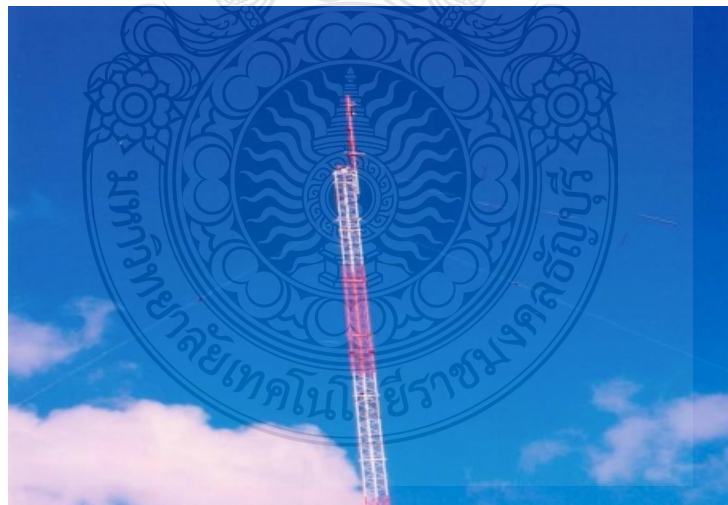
อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลใช้เครื่องรับส่งรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar ตัวอย่างที่สถานีชุมพรดังรูปที่ 3.2 ทำการส่งและรับคลื่นในย่าน 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ ผ่านสายอากาศชนิดไดโพล 2 ชั้น วางตัดขวางกันเป็นโดม ความสูงของเสาที่ยึดสายอากาศสูง 27 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ อาคารสูง เป็นต้นดังรูปที่ 3.3 สายอากาศชั้นที่ทำการส่งคลื่นขึ้นไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์จะวางตั้งฉากกับเสาอากาศชั้นที่ทำการรับคลื่นที่สะท้อนลงมายังโลกโดยส่งคลื่นแบบต่อเนื่อง (Continuous wave) และมีการเพิ่มอัตราความถี่ที่ส่งขึ้นไปทุกๆ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ซึ่งใน 1 รอบของการทำงานจะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาที จากนั้นจะส่งข้อมูลเป็นภาพไอโอโนแกรมไปบันทึกที่คอมพิวเตอร์ แล้วจะทำการปรับสัญญาณนาฬิกาของเครื่องใหม่ในทุกๆรอบของการทำงาน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทุกๆ 1 ชั่วโมงและนำภาพไอโอโนแกรมที่ได้เข้าโปรแกรม Special scaling เพื่อเลือกเก็บข้อมูลของพารามิเตอร์ foE และ foEs กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นนำข้อมูลทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.5 ต่อไป

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ ของการสังเกตโดยไอโอโนซอนเด สถานีชุมพร [23]

ระบบ	Frequency Modulated-Continuous Wave (FM-CW) with pseudo-random Tx/Rx switching
เครื่องรับและเครื่องส่งคลื่น	SKI-96092 FM/CW Radar
กำลังสูงสุดของเครื่องส่ง	20 วัตต์
กำลังเฉลี่ยของเครื่องส่ง	10 วัตต์
ย่านความถี่	2 ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์
อัตราการเพิ่มความถี่	100 กิโลเฮิร์ตซ์ ต่อ วินาที
รอบการทำงาน	5 นาที
เสาอากาศ	สูง 27 เมตร
ชนิดสายอากาศ	Folded Dipole 2 ชั้น มีโพลาริซตั้งฉากต่อกัน
ตำแหน่งของสถานี	เส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก เส้นรุ้งแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ



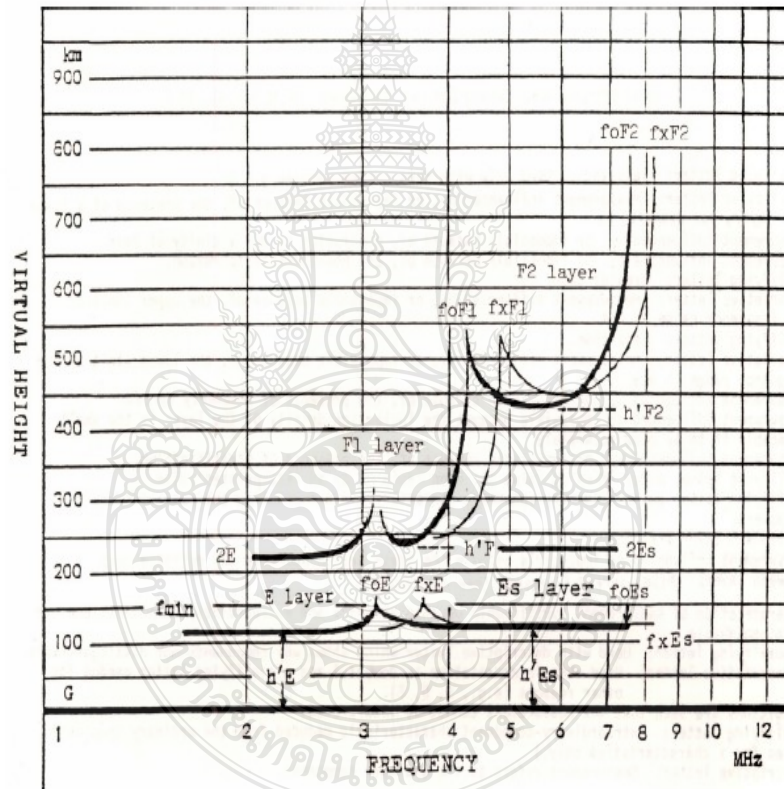
รูปที่ 3.2 เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96029 FM/CW Radar [23]



รูปที่ 3.3 สายอากาศชนิดโพเด็ตไตโพล [23]

3.2 วิธีเก็บค่าพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม

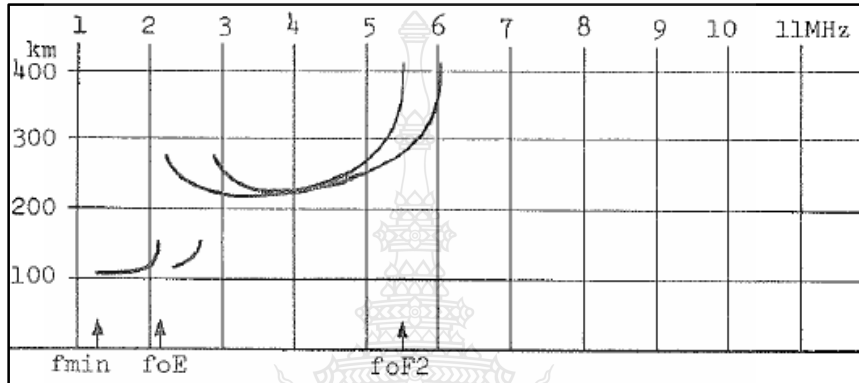
หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาคือ foE และ foEs จากภาพไอโอโนแกรมทั้ง 3 สถานีที่ได้กล่าวมาข้างต้น การเก็บค่าพารามิเตอร์ทำได้โดยใช้โปรแกรม Special scaling วิธีการใช้โปรแกรมจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป รูปที่ 3.4 แสดงภาพจำลองไอโอโนแกรมที่ได้จากเทคนิคไอโอโนซอนด์ ซึ่งจะปรากฏค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สามารถเก็บค่าได้ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น foE, foEs, h'F2, foF2, foF1 เป็นต้น



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม [2]

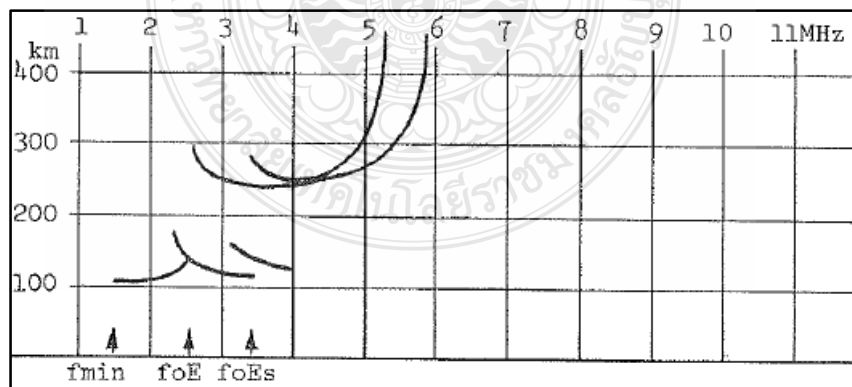
3.2.1 การเก็บค่าพารามิเตอร์ foE

พารามิเตอร์ foE จากไอโอโนแกรม foE เป็นค่าความถี่วิกฤตของชั้น E มักจะพบเห็นในเวลา กลางวันและหายไปในเวลากลางคืนเป็นเพราะพลังงานแสงอาทิตย์ที่ลดลงทำให้ไม่เกิดการไอออไนเซชัน พารามิเตอร์ foE สามารถเกิดได้หลายรูปแบบยกตัวอย่างการดูค่า foE ดังนี้ [2]



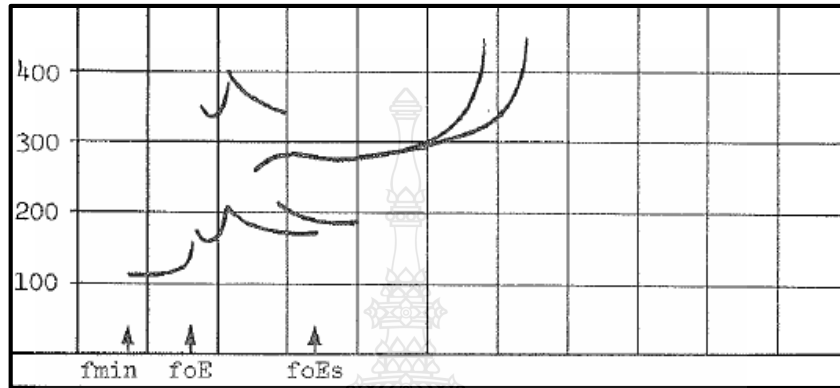
รูปที่ 3.5 ภาพไอโอแกรมในเวลาที่ยังไอโอไนสเฟียร์ปกติ

จากรูปที่ 3.5 ภาพไอโอแกรมในเวลาที่ยังไอโอไนสเฟียร์ปกติ ไม่สามารถเก็บค่าพารามิเตอร์ชั้น Es และ F1 ได้ พารามิเตอร์ foE ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 2.1 เมกะเฮิร์ตซ์

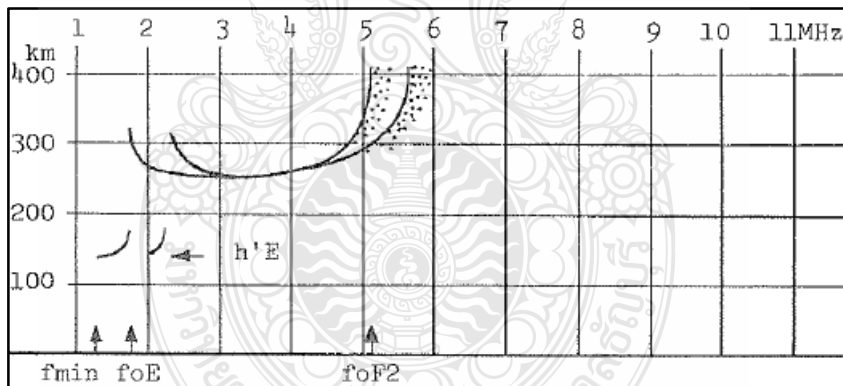


รูปที่ 3.6 ภาพไอโอแกรมที่พารามิเตอร์ foE ไม่ปกติ

จากรูปที่ 3.6 ภาพไอโอแกรมที่พารามิเตอร์ foE ไม่ปกติ จะมีรูปทรงที่ทับซ้อนกัน รูปร่างนี้ถือว่าเป็นเกิดจากการเกิดการสะท้อนพร้อมกันของชั้น E และชั้น Es โดยชั้น E ปกติและการสะท้อนเฉียงจากชั้น Es ค่าพารามิเตอร์ foE เท่ากับ 2.55 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.7 ภาพไอโอแกรมที่พารามิเตอร์ foE รูปทรงอื่นๆ



รูปที่ 3.8 ภาพไอโอแกรมที่ปรากฏพารามิเตอร์ foE ในเวลากลางคืน

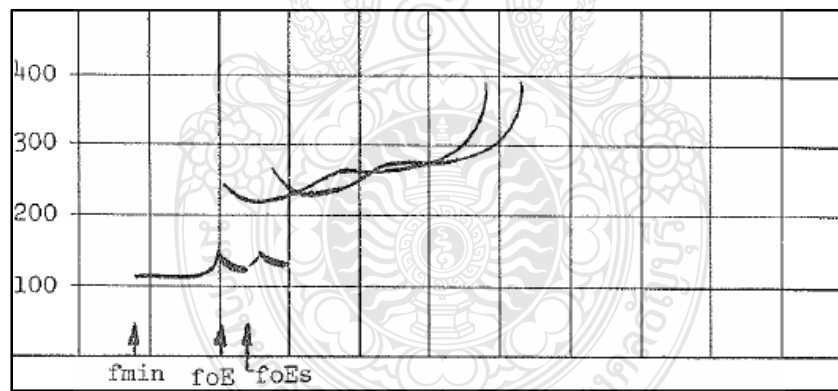
จากรูปที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ foE มีค่าใกล้เคียง 2 ค่า คือ 2.65 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3.05 เมกะเฮิร์ตซ์ รูปแบบเสียงสะท้อนแบบนี้ซึ่งมีแนวโน้มที่จะปรากฏในช่วงเช้าของฤดูร้อนมักทำให้เกิดความสับสนในการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ foE การพิจารณาค่าพารามิเตอร์ foE ควรพิจารณาตามลำดับโดยค่า

2.65 เมกะเฮิร์ตซ์มีความสอดคล้อง ส่วนค่า 3.05 เมกะเฮิร์ตซ์ มีความใกล้เคียงค่าเริ่มต้นของ Es ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ foE เท่ากับ 2.65 เมกะเฮิร์ตซ์

จากรูปที่ 3.8 ภาพไอโอแกรมที่ปรากฏพารามิเตอร์ foE ในเวลากลางคืน จะเห็นได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าลดลงและเกือบจะจางหายไปเนื่องไม่มีพลังงานแสงอาทิตย์ จึงทำให้ กระบวนการไอออไนซ์ในชั้นบรรยากาศน้อยลง ค่าพารามิเตอร์ foE เท่ากับ 1.7 เมกะเฮิร์ตซ์

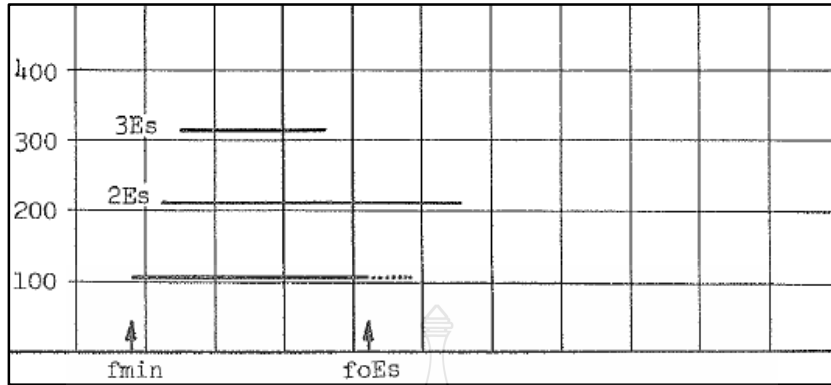
3.2.2 การเก็บค่าพารามิเตอร์ foEs

foEs เป็นค่าความถี่วิกฤตของชั้น Es (Sporadic E) เกิดขึ้นจากความผิดปกติของชั้น E เกิดเพียง ช่วงครู่สามารถเกิดได้ทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืนไม่สามารถทำนายการเกิดล่วงหน้าได้ Sporadic E อาจเกิดจากการสาดแทรกคลื่นหรือปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ การเกิดชั้น Es จะทำให้ไม่สามารถมองเห็น ชั้น F ได้จากไอโอแกรม เนื่องจากถูกบดบังโดยชั้น E เพราะในเวลานั้นมีการไอออไนซ์ของอิเล็กตรอนใน ชั้น E มากกว่าปกติ ตัวอย่างพารามิเตอร์ foEs ดังนี้



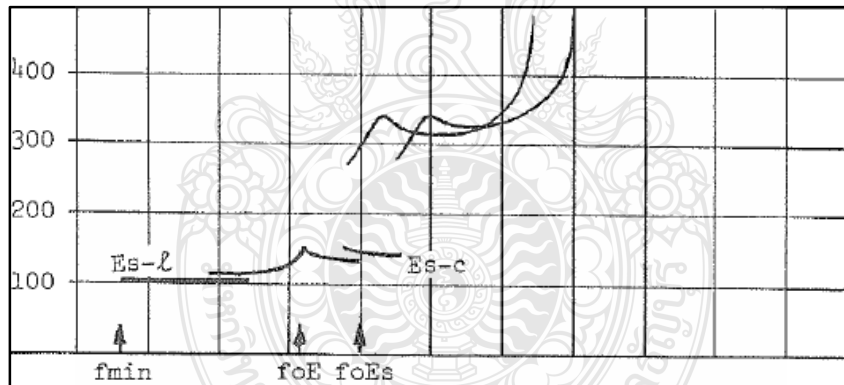
รูปที่ 3.9 ภาพไอโอแกรมพารามิเตอร์ foEs

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs มีเส้นกราฟที่ต่อเนื่องกัน เนื่องจากใน บางครั้งการสะท้อนกลับที่ชั้น Es อาจเกิดการทับซ้อนกันกับการสะท้อนกลับของชั้น F ค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่าเท่ากับ 3.4 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.10 ภาพไอโอโนแกรมชั้น Es มากกว่า 1 ชั้น

จากรูปที่ 3.10 แสดงการสะท้อนของชั้น Es ที่มากกว่า 1 ชั้น จะเห็นได้ว่าการสะท้อนกลับมากกว่า 1 ความถี่ด้านบนจะต่ำลง ค่าพารามิเตอร์ foEs เท่ากับ 5.2 เมกะเฮิร์ตซ์



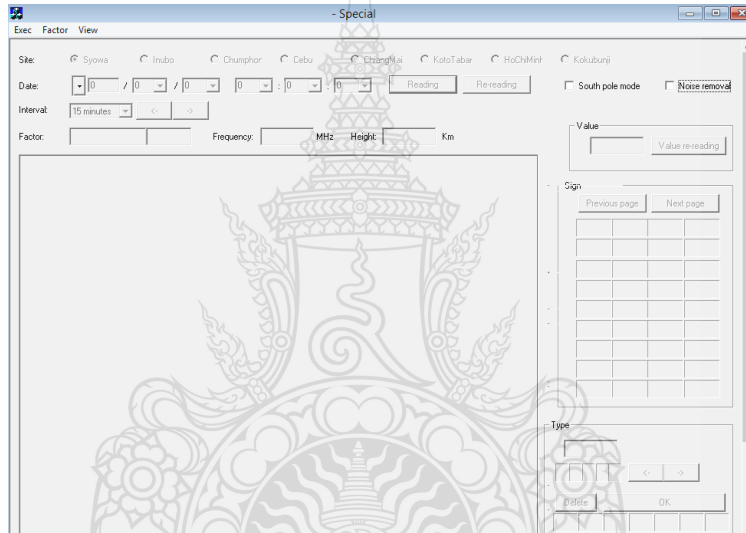
รูปที่ 3.11 ภาพไอโอโนแกรมพารามิเตอร์ foEs

จากรูปที่ 3.11 แสดงภาพไอโอโนแกรมจะสังเกตเห็น Es สองประเภทซึ่งแต่ละชนิดมีความถี่วิกฤตของตัวเอง แต่วัดค่าชั้น Es ที่สูงกว่า ค่าพารามิเตอร์ foEs เท่ากับ 5 เมกะเฮิร์ตซ์

3.3 วิธีการใช้โปรแกรม Special scaling

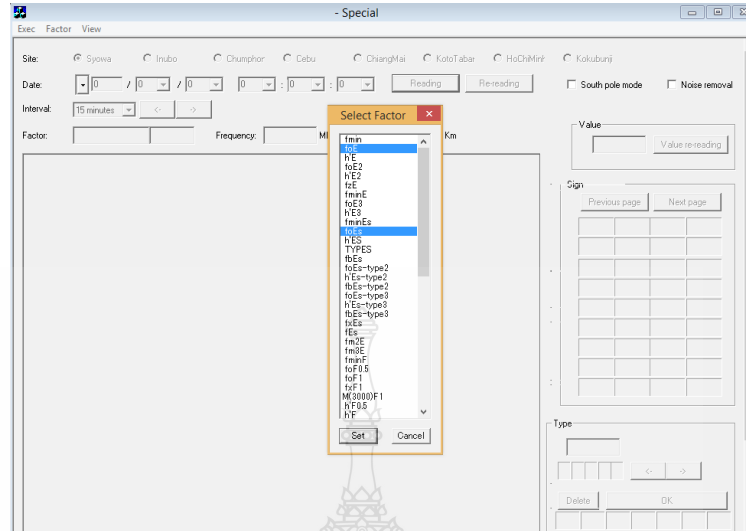
เมื่อทราบการอ่านค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ คือ foE และ foEs แล้ว ในหัวข้อนี้แนะนำวิธีการใช้งานโปรแกรม Special scaling เพื่อใช้เก็บค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ โปรแกรมนี้สามารถเลือกเก็บค่าพารามิเตอร์ได้หลากหลาย เช่น foF2, M(3000)F2, h'F เป็นต้น วิธีการเก็บค่ามีดังนี้

1. ทำการติดตั้งโปรแกรม Special-10C -2000-eng.exe ในคอมพิวเตอร์ และเปิดโปรแกรม Special-10C -2000-eng.exe



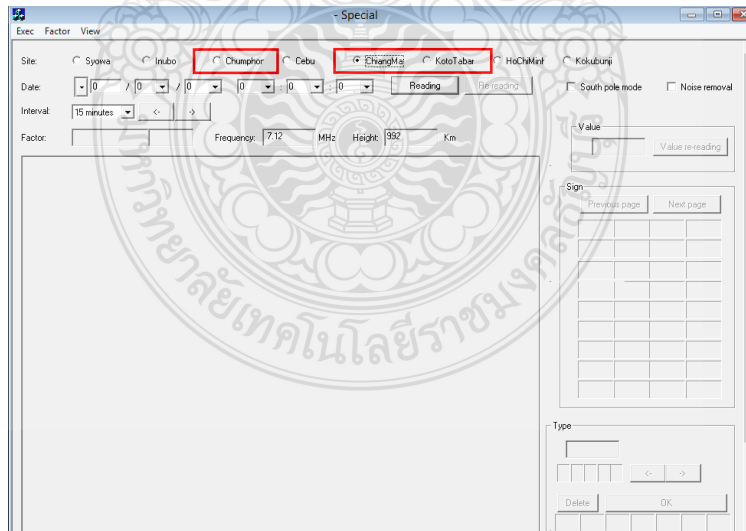
รูปที่ 3.12 ลักษณะโปรแกรม Special scaling

2. ทำการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการโดยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการเก็บค่า foE และ foEs เลือก Exec แล้วเลือก New แล้วทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs ดังรูปที่ 3.13



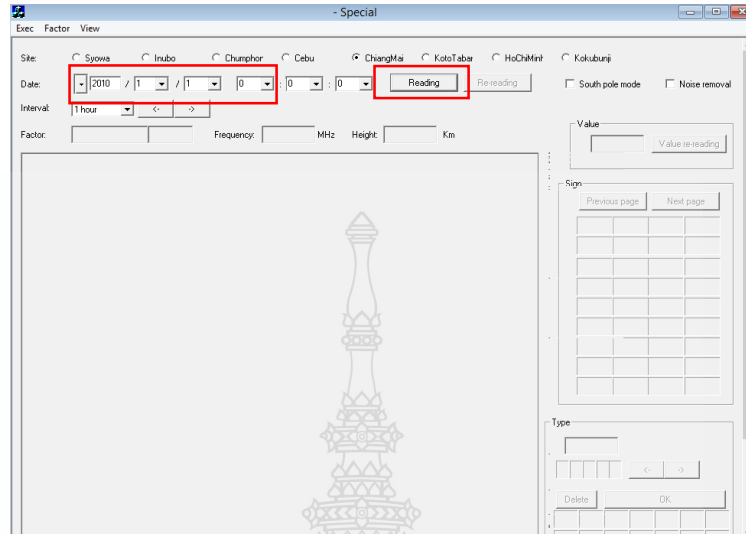
รูปที่ 3.13 การเลือกค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs

- เลือกสถานที่ที่ต้องการจะเก็บข้อมูลโดยวิทยานิพนธ์นี้ต้องการเก็บข้อมูล 3 สถานี ได้แก่ สถานี เชียงใหม่ สถานีชุมพรและสถานีโกโตตาบัง โดยจะเลือกได้ที่ละสถานีเท่านั้น



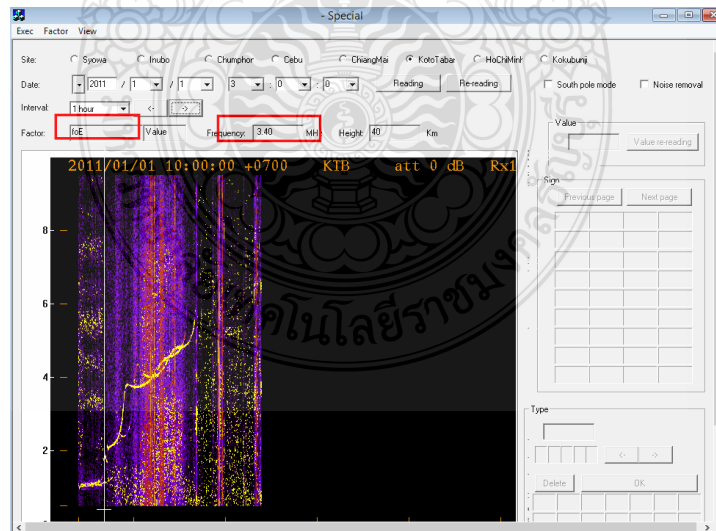
รูปที่ 3.14 การเลือกสถานีไอโอโนซอนเดที่ต้องการเก็บค่าพารามิเตอร์

4. ทำการเลือก วัน เดือน ปี และความถี่ของเวลาที่ต้องการเก็บข้อมูล และกด reading

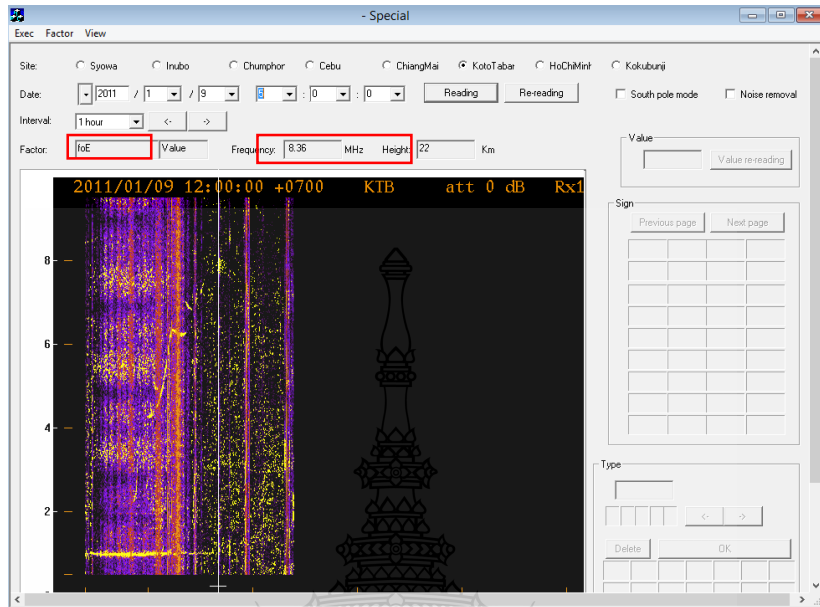


รูปที่ 3.15 เลือก วัน เดือน ปี และเวลาที่ต้องการเก็บค่า

5. ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs ดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 ตามลำดับ



รูปที่ 3.16 วัดค่า foE จากโปรแกรม Special scaling



รูปที่ 3.17 วัดค่า foEs จากโปรแกรม Special scaling

จากรูปที่ 3.17 แสดงค่า foE ของวันที่ 1 มกราคม พ.ศ.2554 เวลา 10.00 น. ที่สถานีโกโคตาบัง ค่า foE เท่ากับ 3.40 เมกะเฮิร์ตซ์ และรูปที่ 3.12 แสดงค่า foEs foE ของวันที่ 9 มกราคม พ.ศ.2554 เวลา 12.00 น. ที่สถานีโกโคตาบัง ค่า foE เท่ากับ 8.36 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

3.4 วิธีเก็บข้อมูล IRI

IRI model (International Reference Ionosphere) คือแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของตัวแปรต่างๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามความแตกต่างของชุดคำสั่ง คือ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Radio Consultative Committee (CCIR,1966) และ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Union of Radio Science (URSI,1989) สามารถเก็บข้อมูลผ่านเว็บไซต์ https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php ดังรูปที่ 3.18 เว็บไซต์จะเก็บข้อมูล IRI model โดยที่เราเลือกเก็บตามพิกัด

ที่จะนำค่ามาใช้ด้วยการใส่ละติจูดและลองจิจูดตามสถานีเดียวกันกับที่เราจะนำค่ามาวิเคราะห์คือ สถานี เชียงใหม่ สถานีชุมพรและสถานีโกโคโตบัง จากนั้นทำการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการและดาวน์โหลดข้อมูล เพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

International Reference Ionosphere - IRI (2016) with IGRF-13 coefficients

This page enables the computation and plotting of IRI parameters: electron and ion (O⁺, H⁺, He⁺, O²⁺, NO⁺) densities, total electron content, electron, ion and neutral (CIRA-86) temperatures, equatorial vertical ion drift and others.

[Go to the IRI description](#)

Select Date and Time
 Year: [1958-2020] | [2000]
 Month: [January] | Day: [1-31] | [51]
 Note: If date is outside the Ap index range (1958 02 14-2020 4 2), then STORM model will be turned off.
 Time (Universal) | Time (0. - 24.0 in decimal hours): [1.5]
 Select Coordinates
 Coord. Type: [Geographic] | Latitude: [-90. - 90. deg.] | [50.] | Longitude: [0. - 360. deg.] | [40.]
 Height (km, from 60. to 2000.): [100]
 Select profile type and range:
 Height [80. - 2000. km] | Start [100.] | Stop [2000.] | Stepsize [50.]

Optional Input:
 Sunspot number, R12 (0. - 400.) | Ionospheric index, IG12 (-50. - 400.) |
 F10.7 radio flux, daily (0. - 400.) | F10.7 radio flux, 81-day (0. - 400.) |
 Electron content: Upper boundary (50. - 2000. km) |

Ne Topside [NeQuick] | Ne F-peak [URSI] | F-peak storm model [on] | F-peak height [AMTB2013] |
 Bottomside Thickness [ABT-2009] | F1 occurrence probability: [Scotto-1997 no L.] |
 Auroral boundaries [on] | E-peak auroral storm model [off] | D-region model [IRI-25] |
 Te Topside [TBT2012+SA] | Ion Composition [REV10/TBT15] |

รูปที่ 3.18 เว็บไซต์เก็บข้อมูล IRI [29]

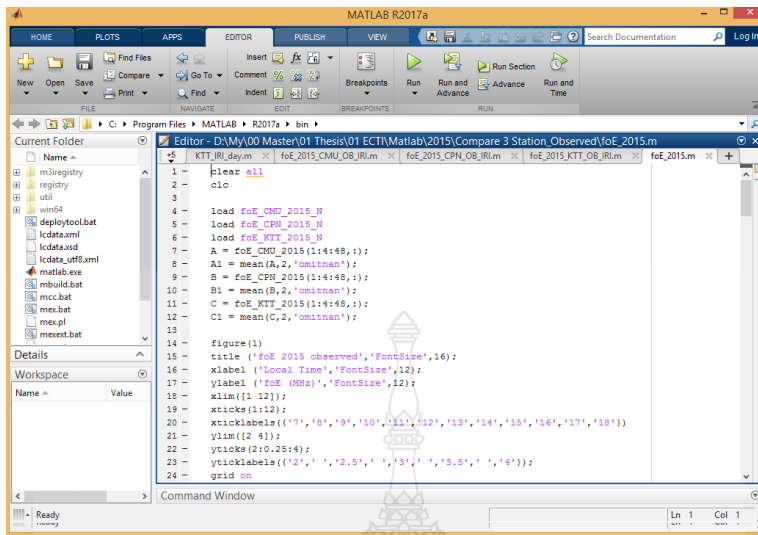
3.5 การวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม MATLAB

เมื่อได้ข้อมูลจากการเก็บค่าโดยโปรแกรม special scaling และข้อมูล IRI model-2016 แล้วนั้น จะนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม Matlab เป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขและ visualization ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการทำงานภายในโปรแกรม Matlab สามารถทำงานแบบตอบโต้ ซึ่งคล้ายกับภาษา C และ Pascal นอกจากนี้ยังสามารถใช้ Matlab เป็นเสมือนเครื่องคิดเลขทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ระดับสูงได้อย่างรวดเร็ว การใช้โปรแกรม Matlab สามารถทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ สามารถสร้างและกำหนดค่าตัวแปรได้ทันทีโดยไม่ต้องประกาศตัวแปรก่อน ข้อมูลไม่ว่าจะเป็นตัวเลขหรือตัวอักษร (string) จะถูกจัดเก็บในรูปแบบของแถวและหลัก หรือ array ซึ่งก็คือ matrix นั่นเอง เช่น จำนวนสเกลลาร์ (scalar) จะถูกแทนด้วยเมตริกซ์ขนาด 1x1 ข้อมูลที่เป็นเวกเตอร์จะถูกแทนที่ด้วยเมตริกซ์ที่มีเพียง 1 แถว ในกรณีที่เป็นเวกเตอร์แบบแถว (Row vector) หรือถูกแทนที่ด้วยเมตริกซ์ที่มีเพียง 1 หลัก ในกรณีที่เป็น

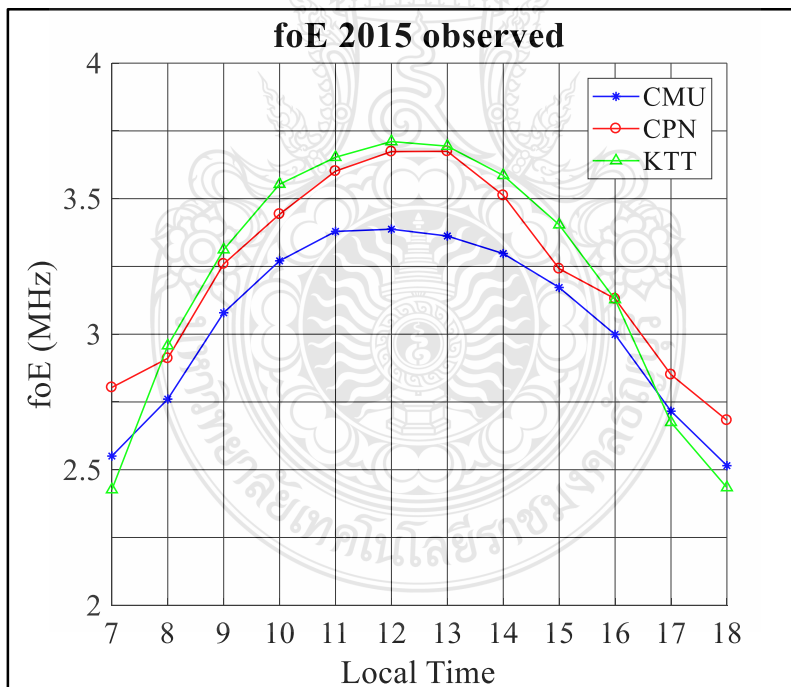
เวกเตอร์แบบหลัก (Column vector) เป็นต้น การที่ Matlab ๔ ออกแบบมาให้มีการทำงานเช่นนี้ทำให้การเขียนโปรแกรมแก้โจทย์ปัญหาที่มีลักษณะของ vector และ matrix เป็นเรื่องง่ายความสามารถของโปรแกรม Matlab เบื้องต้นมีดังนี้

1. Matlab เป็นโปรแกรมเพื่อการคำนวณและแสดงผลได้ทั้งตัวเลขและรูปภาพที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถทำการเขียนกราฟได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถควบคุมการทำงานของ Matlab ด้วยชุดคำสั่ง (command line) และยังสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรม (script file) ได้ด้วย
3. ลักษณะการเขียนโปรแกรมใน Matlab จะใกล้เคียงการเขียนสมการในคณิตศาสตร์ จึงง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C, Pascal, Fortran และอื่นๆ
4. Matlab มีฟังก์ชันสำเร็จรูป (built-in function) เพื่อทำงานเฉพาะทางมากมาย นอกจากนี้ผู้ใ้ยังสามารถเขียนฟังก์ชันขึ้นมาใหม่โดยใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันที่มีอยู่เดิมได้ เพื่อให้เหมาะสมกับงานของผู้ใช้แต่ละกลุ่มสำหรับผู้ใช้ที่ต้องการใช้งานเฉพาะทางขั้นสูง เช่น งานด้าน Control, Image Processing, Artificial Neural Network หรืออื่นๆ Matlab ก็มี toolbox หรือชุด function พิเศษ เพื่อทำงานเฉพาะทางนั้นๆ ด้วย
5. Matlab สามารถเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลแบบ Dynamic Link กับโปรแกรมอื่นๆ ได้ เช่น Excel หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองจากภาษา C หรือ Visual Basic ที่ร่วมทำงานอยู่บนปฏิบัติการ Windows

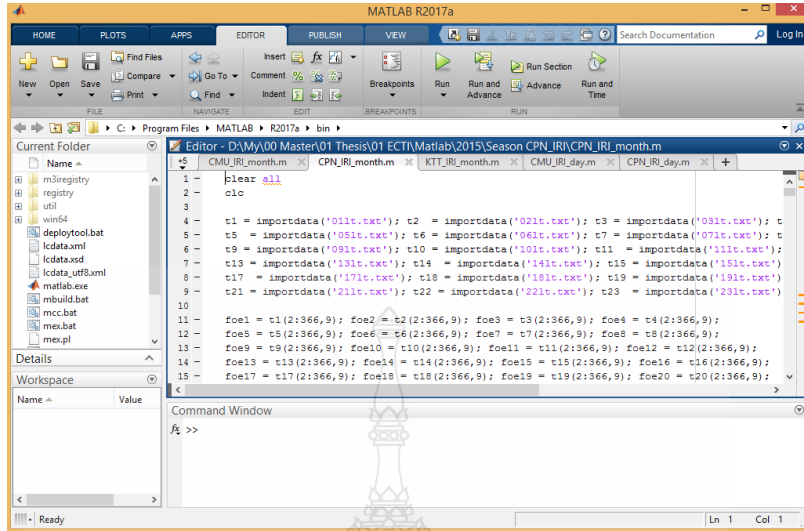
การเขียนคำสั่งที่ใช้วิเคราะห์ผลในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงค่าเฉลี่ยรายปี รายเดือนและค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่เก็บกับข้อมูลจาก IRI model ตัวอย่างคำสั่งค่าเฉลี่ยรายปีดังรูป 3.14 ผลของคำสั่งจะออกเป็นรูปแบบกราฟแสดงผลในปีนั้นๆ ดังรูปที่ 3.19



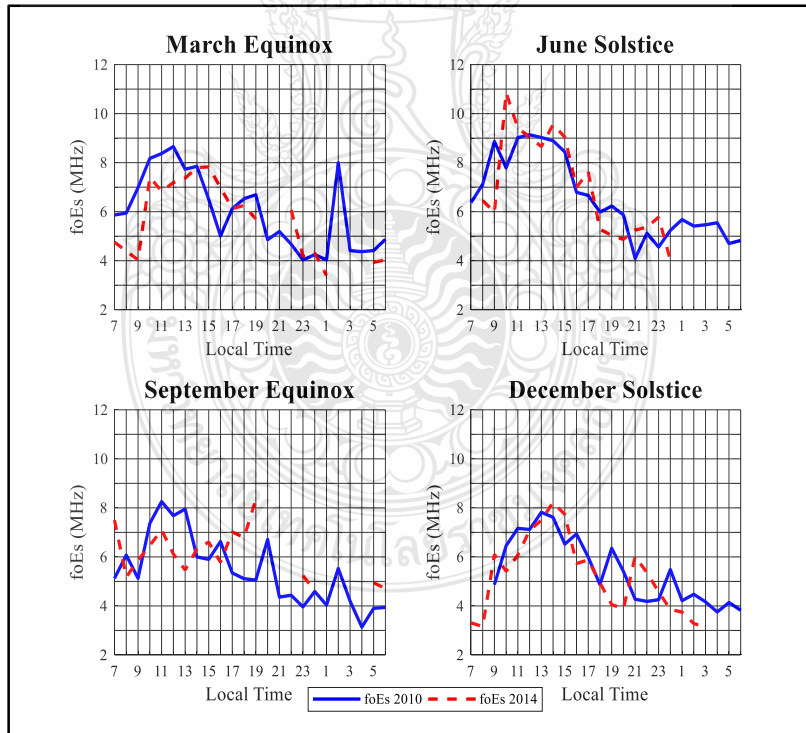
รูปที่ 3.19 คำสั่งโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์ผลรายปี



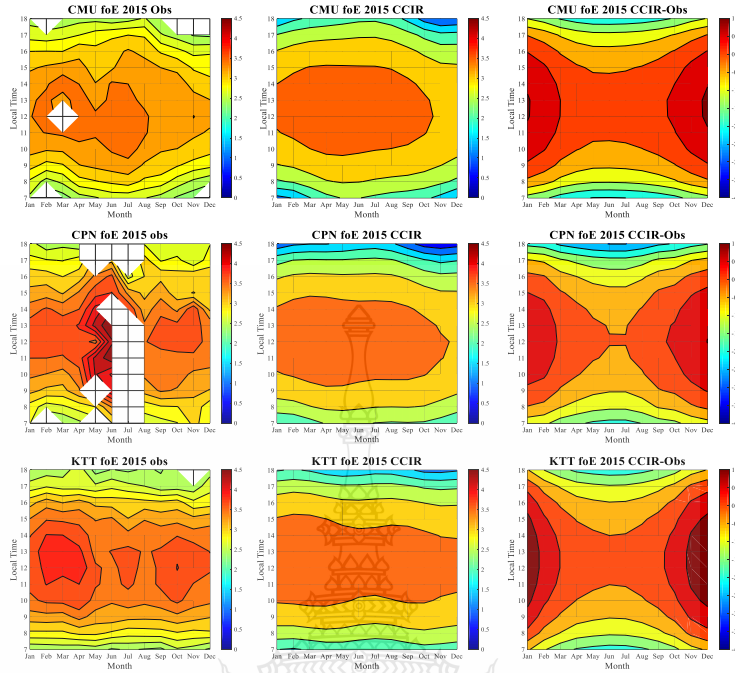
รูปที่ 3.20 ผลของ foE ทั้ง 3 สถานี



รูปที่ 3.21 คำสั่งโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์ผลรายเดือน



รูปที่ 3.22 ผลแบบกราฟเปรียบเทียบรายเดือน



รูปที่ 3.23 ผลแบบ Contour

3.6 สรุป

จากการค้นคว้าพบว่ามีบทความจำนวนมากที่ถูกตีพิมพ์เกี่ยวกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ E โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ foE และ foEs เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แต่ละสถานที่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์บริเวณละติจูดกลางหรือบริเวณ conjugate point รวมถึงการศึกษาการพารามิเตอร์ในช่วงปีที่เกิดกิจกรรมดวงอาทิตย์และการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ได้จากการทำนายแบบจำลอง IRI (International Reference Ionosphere) ซึ่งในประเทศไทยได้มีงานวิจัยซึ่งถูกตีพิมพ์เกี่ยวกับการศึกษาพารามิเตอร์ foE เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI ที่สถานีชุมพร เท่านั้น การศึกษาพารามิเตอร์ foE และ foEs ยังไม่แพร่หลาย และยังไม่มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ดังกล่าวในบริเวณละติจูดต่ำซึ่งอยู่บริเวณเหนือ กลางและต่ำกว่าเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก [1]-[21]

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE และ foEs ตั้งแต่ พ.ศ. 2553 ถึง พ.ศ.2561 ทั้งสิ้น 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพรและสถานีโกโตตบบัง โดยจะทำการ

เก็บค่าพารามิเตอร์ foE และ foEs ทุกๆ 1 ชั่วโมง จากภาพไอโอโนแกรมผ่านโปรแกรม special scaling และนำข้อมูลมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 สถานีและเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง



บทที่ 4

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตในชั้นบรรยากาศ E

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในพื้นที่ละติจูดต่ำโดยทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนเดทั้งสิ้น 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ ตั้งอยู่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถานีชุมพรตั้งอยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ สถานีโกโตตาบัง National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก ทำการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงตั้งแต่ปี ค.ศ.2010 ถึงปี ค.ศ. 2018 โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบรายวัน รายเดือน รายปี รายฤดูกาล ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ (ค.ศ.2010) และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง (ค.ศ.2015) และทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ค่าการหาค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบนระหว่างค่าที่วัดได้กับแบบจำลอง IRI-2016 คำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$\Delta foE(\%) = [(foE_{IRI} - foE_{obs}) / foE_{obs}] \times 100\% \quad (4.1)$$

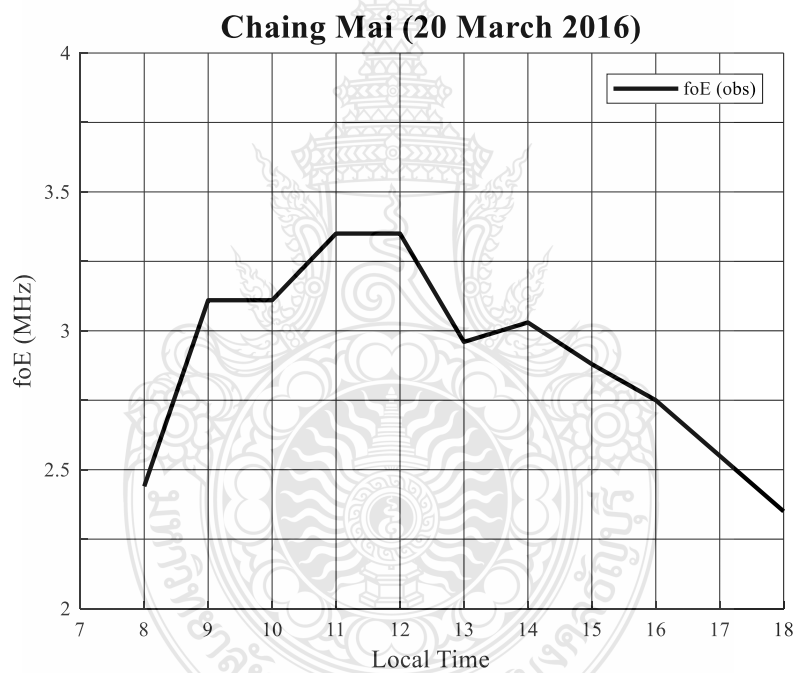
โดยที่ foE_{IRI} คือค่าความถี่วิกฤตที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 และ foE_{obs} คือค่าความถี่วิกฤตที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม

4.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น E (foE) จากค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม เวลา 7.00 น. ถึง 18.00 น. ที่สถานีเชียงใหม่ตั้งอยู่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก

4.1.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่แบบรายวัน

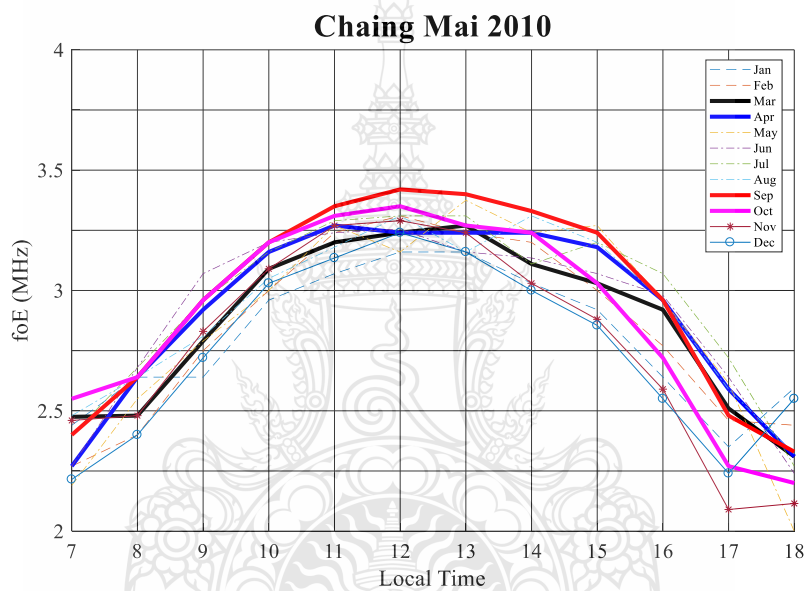
ทำการวิเคราะห์ช่วงเวลากลางวัน เนื่องจากช่วงเวลากลางคืนค่าความถี่วิกฤตบางเบาเนื่องจากไม่เกิดกระบวนการไอออไนเซชันในชั้นบรรยากาศ ในหัวข้อนี้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE แบบรายวันโดยวันที่ทำการเลือกวิเคราะห์ข้อมูลคือวันที่ 20 มีนาคม 2016 แสดงดังรูปที่ 4.1 จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ foE จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น มีค่ามากที่สุดในช่วงเวลากลางวันและเริ่มมีค่าลดลงช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดิน โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.35 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 12.00 น. และค่าความถี่วิกฤตมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 2.35 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดช่วงเวลา 18.00 น.



รูปที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 20 มีนาคม 2016 สถานีเชียงใหม่

4.1.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่แบบรายเดือน

รูปที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ foE แบบรายเดือนกันยายน ปี 2010 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้นั้นมีค่าคล้ายกับผลวิเคราะห์แบบรายวันคือช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ค่าพารามิเตอร์ foE จะเริ่มมีค่ามากขึ้น มีค่ามากที่สุดในช่วงเวลากลางวันและเริ่มลดลงในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดิน โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่ามากที่สุดในเวลา 12.00 น. โดยเดือนกันยายนมีค่าพารามิเตอร์ foE สูงที่สุดและเดือนมกราคมมีค่าพารามิเตอร์ foE ต่ำที่สุด

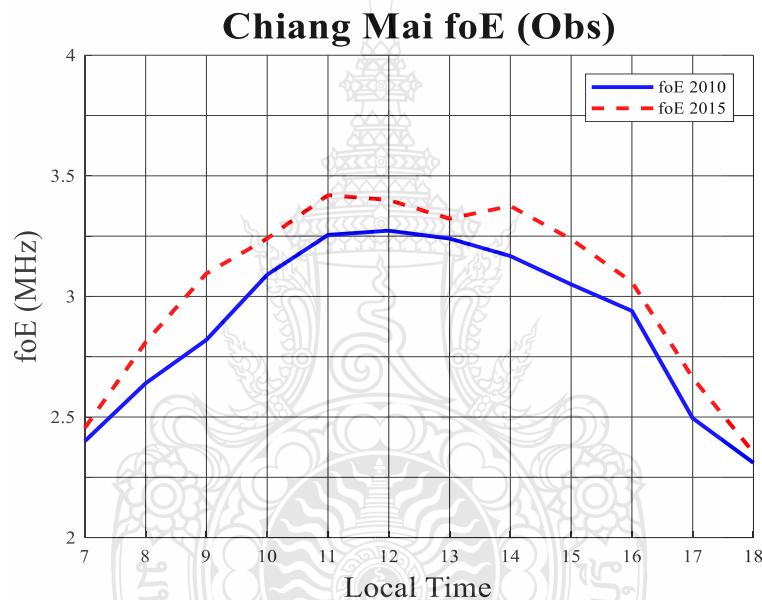


รูปที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ foE เฉลี่ยรายเดือนของปี 2010 สถานีเชียงใหม่

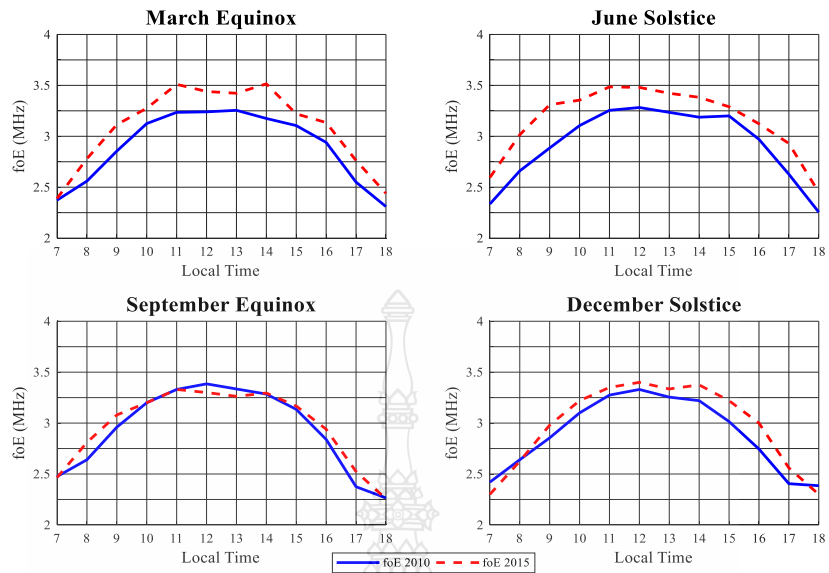
4.1.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล

จากการนำข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมมาทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำปี 2010 และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงปี 2015 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ foE และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศดังรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำในปีแสดงในกราฟเส้นทึบและปีที่

เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงในปีแสดงในกราฟเส้นประที่สถานีเชียงใหม่ จะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. มีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และมีค่าลดลงตั้งแต่ 14.00 น. ถึง 18.00 น. ทั้งสองปี จะพบว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ foE สูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ โดยปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าความถี่วิกฤตอยู่ระหว่าง 2.35 ถึง 3.42 เมกะเฮิรตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าความถี่วิกฤตอยู่ระหว่าง 2.31 ถึง 3.27 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำปี 2010 และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงปี 2015 สถานีเชียงใหม่



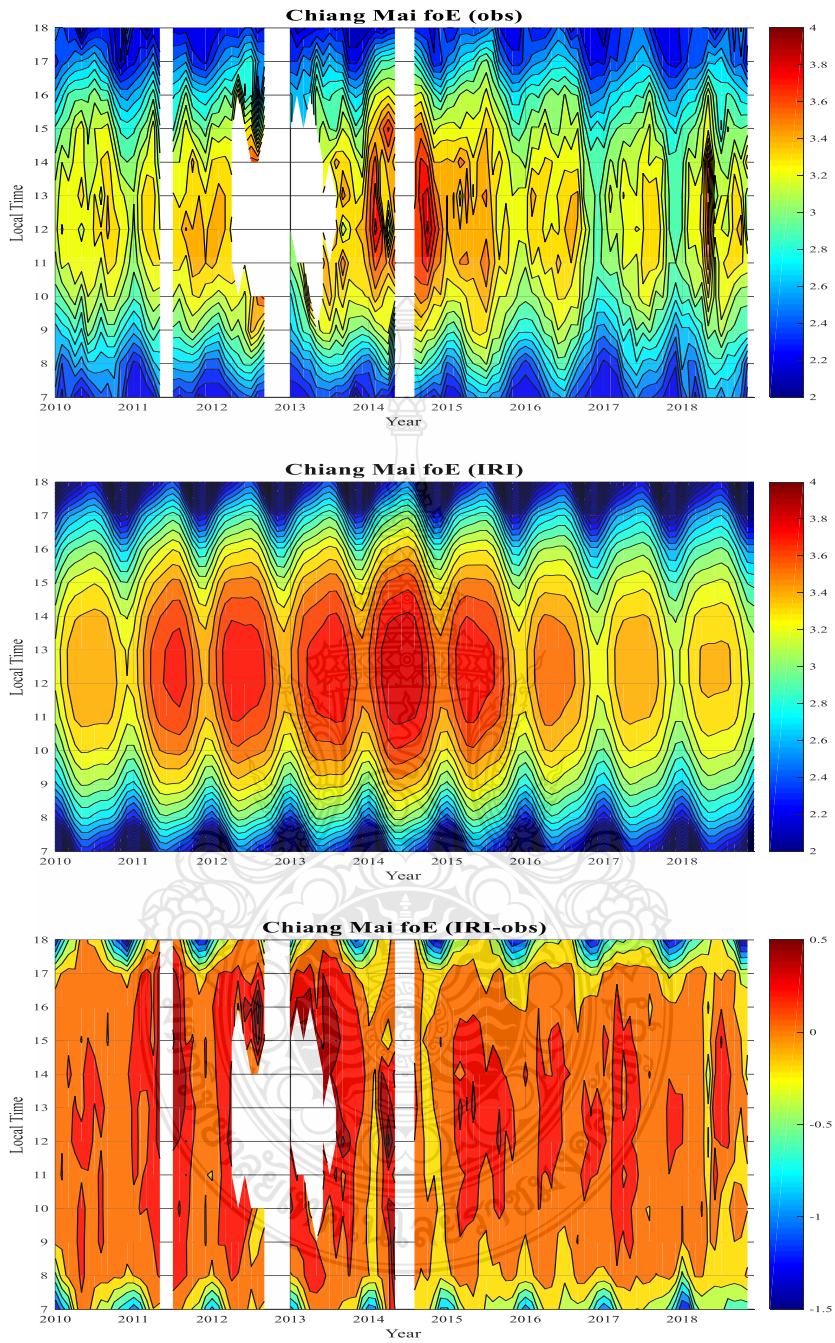
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำปี 2010 และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงปี 2015 แบบแบ่งฤดูกาล สถานีเชียงใหม่

รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประ แบบแบ่งฤดูกาล ที่สถานีเชียงใหม่ ที่ฤดู March Equinox และฤดู June Solstice ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำตลอดทั้งสองฤดูกาล โดยค่าความถี่วิกฤตฤดู March Equinox ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.39 ถึง 3.51 เมกะเฮิรตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.31 ถึง 3.25 เมกะเฮิรตซ์ และค่าความถี่วิกฤตฤดู June Solstice ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.45 ถึง 3.48 เมกะเฮิรตซ์และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.25 ถึง 3.28 เมกะเฮิรตซ์ ที่ฤดู September Equinox ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. และช่วงเวลา 14.00 น. ถึง 18.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ แต่ช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง โดยค่าความถี่วิกฤตปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่า

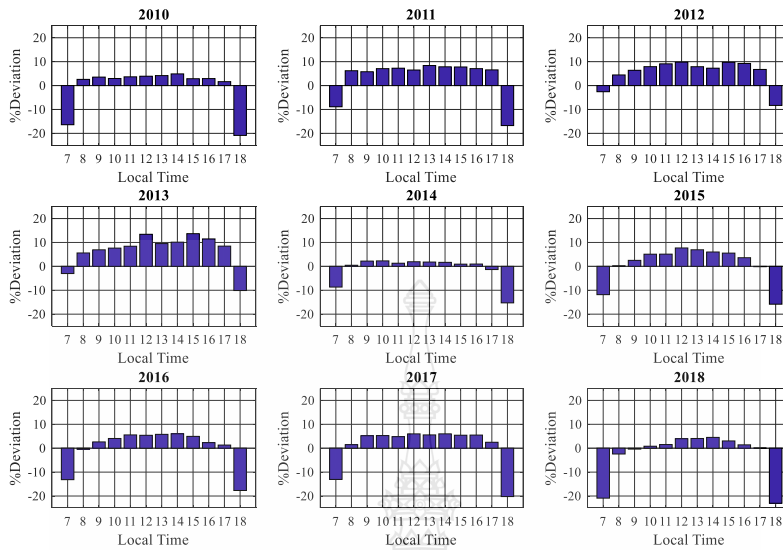
ระหว่าง 2.25 ถึง 3.33 เมกะเฮิรตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.26 ถึง 3.38 เมกะเฮิรตซ์ ที่ฤดู December Solstice ค่าพารามิเตอร์ foE ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นและพระอาทิตย์ตกปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง แต่ช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำโดยค่าความถี่วิกฤตปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.30 ถึง 3.40 เมกะเฮิรตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.38 ถึง 3.33 เมกะเฮิรตซ์

4.1.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016

รูปที่ 4.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ foE จากค่าที่วัดได้ (รูปบน) ค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่ามากขึ้นตั้งแต่ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 11.00 น. มีค่ามากที่สุดในช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มลดลง ตั้งแต่ 15.00 น. ถึง 18.00 น. เนื่องมาจากการเกิดไอออโนสเฟียร์ในชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ส่งผลต่อความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ โดยค่าความถี่วิกฤตสูงสุดมีค่า 3.92 เมกะเฮิรตซ์ และมีค่าต่ำสุด 2 เมกะเฮิรตซ์ จะเห็นได้ว่าในปี 2014 และ 2015 ช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE มีค่าสูงกว่าปีอื่นๆ เนื่องจากอยู่ในช่วงปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง เช่นเดียวกับ (รูปกลาง) แสดงค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 ค่าพารามิเตอร์ foE จะเริ่มมีค่ามากขึ้นช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. มีค่ามากที่สุดช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 15.00 น. และเริ่มมีค่าลดลง ช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 18.00 น. (รูปล่าง) แสดงผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมและแบบจำลอง IRI-2016 สังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม รูปที่ 4.6 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าพารามิเตอร์ foE ที่เก็บได้จากภาพไอโอโนแกรมกับค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลอง IRI-2016 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลา 7.00 น. และ 18.00 น. ของทุกปีมีความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นและพระอาทิตย์ตก ค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองจึงต่างกันมากเพราะกระบวนการเกิดไอออโนสเฟียร์ในช่วงเวลาดังกล่าวผันผวนเนื่องจากแสงอาทิตย์ค่อนข้างน้อย และในช่วงเวลากลางวันค่าความคลาดเคลื่อนเป็นบวกเนื่องจากค่าพารามิเตอร์จากแบบจำลองมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (บน) IRI modal-2016 (กลาง) ผลต่าง(ล่าง) ที่สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 4.6 ค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ที่สถานีเชียงใหม่

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่

ปี	ค่าเฉลี่ยรายปีของพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
2010	2.40	2.64	2.82	3.09	3.26	3.27	3.24	3.17	3.05	2.94	2.50	2.31
2011	2.27	2.64	2.96	3.18	3.31	3.36	3.31	3.20	3.03	2.79	2.38	2.22
2012	2.31	2.73	3.07	3.23	3.36	3.40	3.35	3.33	3.16	2.88	2.60	2.30
2013	2.31	2.64	3.02	3.27	3.35	3.28	3.31	3.27	3.02	2.74	2.53	2.26
2014	2.32	2.79	3.19	3.37	3.61	3.67	3.55	3.49	3.45	3.20	2.77	2.29
2015	2.46	2.81	3.10	3.24	3.42	3.40	3.32	3.38	3.24	3.06	2.66	2.35
2016	2.34	2.60	2.98	3.16	3.28	3.29	3.31	3.26	3.09	2.96	2.59	2.31
2017	2.31	2.62	2.81	3.04	3.18	3.23	3.21	3.16	3.02	2.79	2.45	2.31
2018	2.50	2.66	2.94	3.07	3.27	3.24	3.20	3.16	3.03	2.83	2.48	2.40

ตาราง ที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE ตั้งแต่ปี 2010 ถึง 2018 ช่วงเวลา 7.00 น.ถึง 18.00 น. ที่สถานีเชียงใหม่ จะเห็นได้ว่าค่า foE จะมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลาเช้ามีสูงที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น.และค่าค่อยลดต่ำลงถึงช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินของทุกปี โดยค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.67 เมกะเฮิรตซ์ ที่เวลา 12.00 น. ของปี 2014 และ ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่ โดยแบ่งฤดูกาลออกเป็น March Equinox (มีนาคม-เมษายน), June Solstice(พฤษภาคม-สิงหาคม), September Equinox(กันยายน-ตุลาคม) และ December Solstice(พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) เปรียบเทียบกับค่าแบบจำลอง IRI-2016 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากการวัดจากภาพโอโซนแกรมมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ในทุกฤดูกาลและทุกปี โดยมีค่าพารามิเตอร์ foE ต่างกันอยู่ที่ประมาณ 0.2 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่

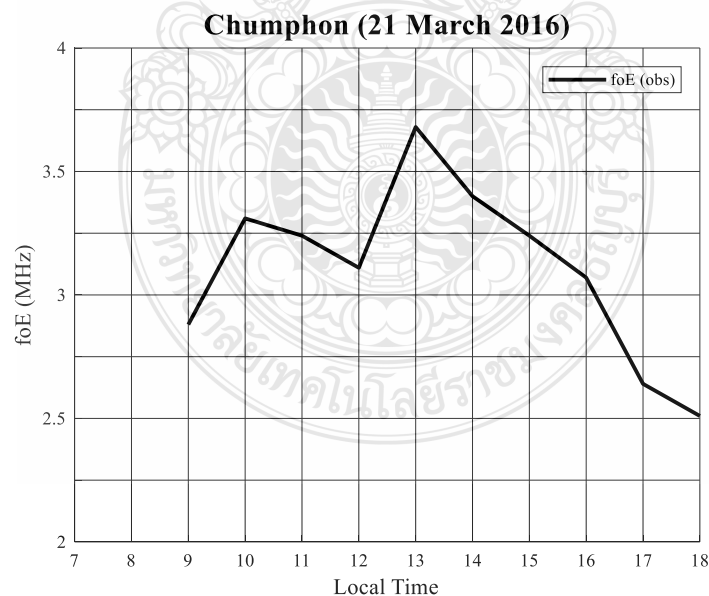
ปี	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foE ของสถานีเชียงใหม่							
	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)		June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)		September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)		December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)	
	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model	Observe	IRI-model
2010	2.995	3.119	3.060	3.186	2.995	3.091	2.843	2.990
2011	3.025	3.256	2.940	3.372	3.103	3.272	2.995	3.153
2012	3.135	3.406	2.900	3.440	2.800	3.278	2.698	3.123
2013	2.680	3.351	3.000	3.425	3.133	3.347	3.090	3.211
2014	3.235	3.477	3.270	3.550	3.330	3.378	3.180	3.202
2015	3.200	3.416	3.283	3.426	3.148	3.230	2.920	3.036
2016	3.070	3.240	3.110	3.253	3.013	3.071	2.790	2.908
2017	2.900	3.125	3.050	3.177	2.940	3.027	2.760	2.875
2018	2.960	3.073	3.033	3.124	2.990	2.991	2.968	2.842

4.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น E (foE) จากค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม ตั้งแต่ปี 2010 ถึงปี 2018 ที่สถานีชุมพรตั้งอยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก ทำการวิเคราะห์ช่วงเวลากลางวัน

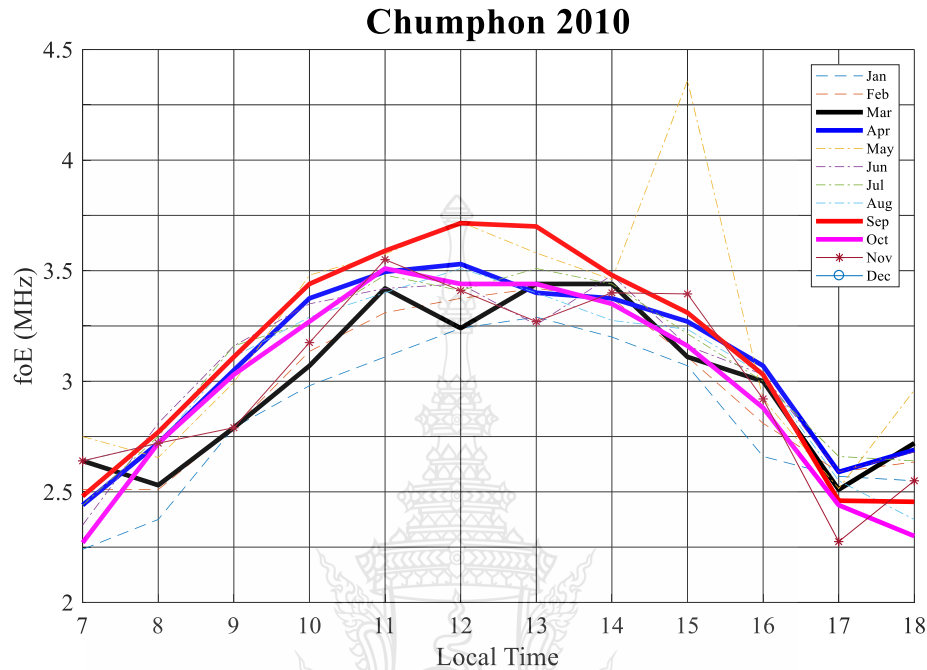
4.2.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรแบบรายวัน

รูปที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 21 มีนาคม 2016 ตั้งแต่เวลา 7.00 น. ถึง 18.00 น. โดยช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 8.00 น. ไม่ปรากฏในกราฟเนื่องจากไม่สามารถเก็บค่าได้เวลา 9.00 น. สังเกตเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์จะเริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ 10.00 น. และลดต่ำลงที่เวลา 12.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าเท่ากับ 3.11 เมกะเฮิรตซ์ จากนั้นค่าพารามิเตอร์พุ่งสูงขึ้นอีกครั้งที่เวลา 13.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าเท่ากับ 3.68 เมกะเฮิรตซ์ และค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีลดต่ำลงจนถึงช่วงเวลา 18.00 น. มีค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 2.51 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 21 มีนาคม 2016 สถานีชุมพร

4.2.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรแบบรายเดือน



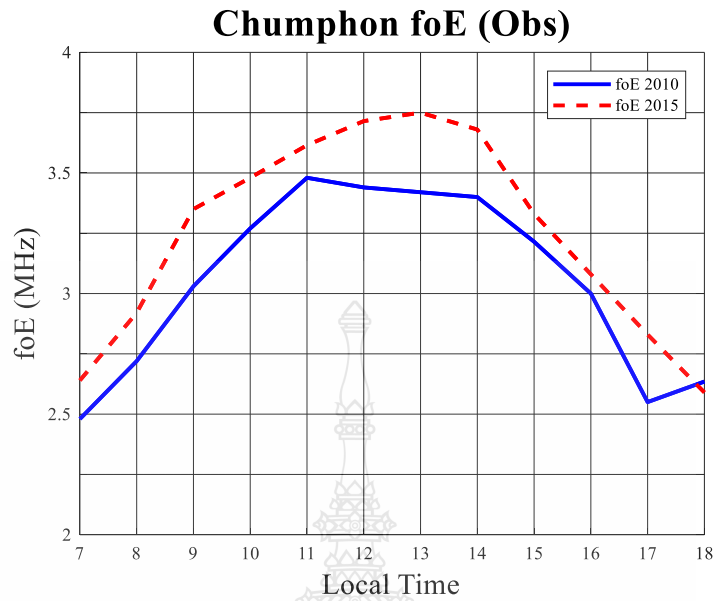
รูปที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์ foE เฉลี่ยรายเดือนของปี 2010 สถานีชุมพร

รูปที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ foE แบบรายเดือนปี 2010 จะพบว่าในช่วงเวลา 7.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าสูงขึ้นจนถึงช่วงเวลา 12.00 หลังจากนั้นได้ลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงเวลา 18.00 น. จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE เดือนกันยายนมีค่าสูงที่สุดและในเดือนมกราคมมีค่าพารามิเตอร์ foE ต่ำที่สุด ในเดือนพฤษภาคมค่าพารามิเตอร์ foE ได้มีค่าพุ่งสูงขึ้นที่ช่วงเวลา 15.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 4.36 เมกะเฮิร์ตซ์ และลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว

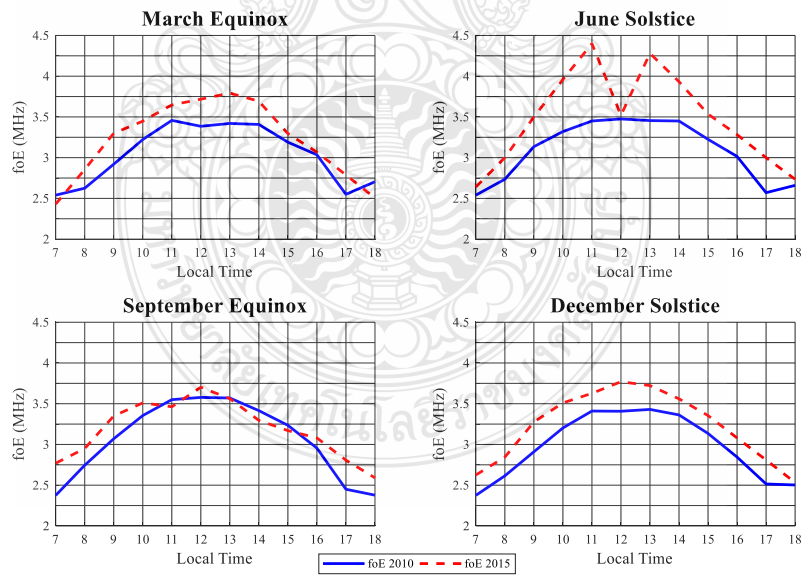
4.2.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล

จากข้อมูลที่น่ามาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ foE ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำคือปี 2010 และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงในปี 2015 ทำการหาค่าเฉลี่ยในแต่ละปีและแสดงข้อมูล

ดังรูปที่ 4.9 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประที่สถานีชุมพร จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. มีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และมีค่าลดลงตั้งแต่ 14.00 น. ถึง 18.00 น. ทั้งสองปี จะพบว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ foE สูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ โดยปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าความถี่วิกฤตอยู่ระหว่าง 2.59 ถึง 3.75 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าความถี่วิกฤตอยู่ระหว่าง 2.48 ถึง 3.48 เมกะเฮิร์ตซ์ จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประแบบแบ่งฤดูกาล ที่สถานีชุมพร ที่ฤดู March Equinox ฤดู June Solstice และฤดู December Solstice ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำตลอดทั้งสามฤดูกาล โดยค่าความถี่วิกฤตฤดู March Equinox ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.43 ถึง 3.79 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.54 ถึง 3.45 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่วิกฤตฤดู June Solstice ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.64 ถึง 4.40 เมกะเฮิร์ตซ์และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.54 ถึง 3.47 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตฤดู December Solstice ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.53 ถึง 3.77 เมกะเฮิร์ตซ์และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.37 ถึง 3.43 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ฤดู September Equinox ช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 15.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าใกล้เคียงปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ แต่ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. และ 16.00 น. ถึง 18.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ โดยค่าความถี่วิกฤตปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.59 ถึง 3.70 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.37 ถึง 3.57 เมกะเฮิร์ตซ์

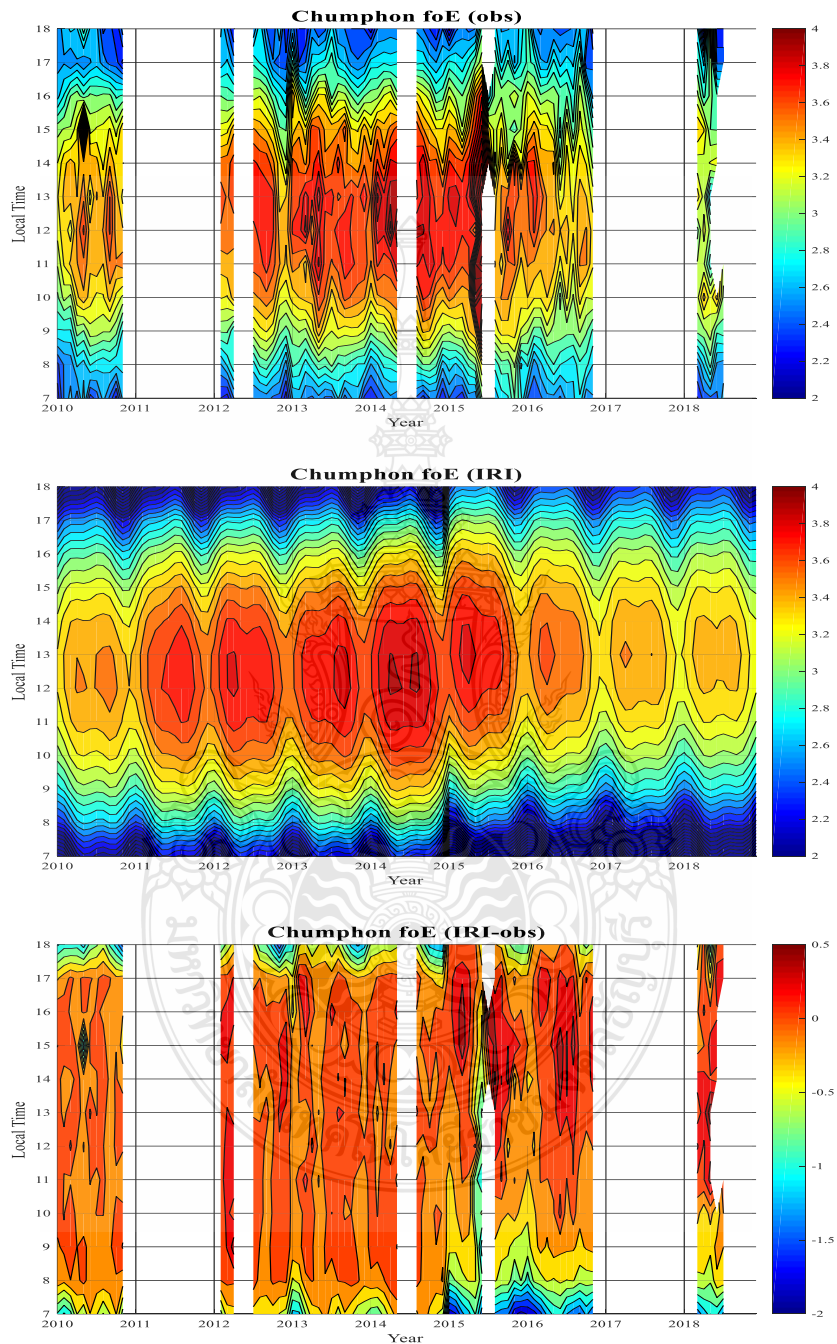


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีชุมพร



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีชุมพร

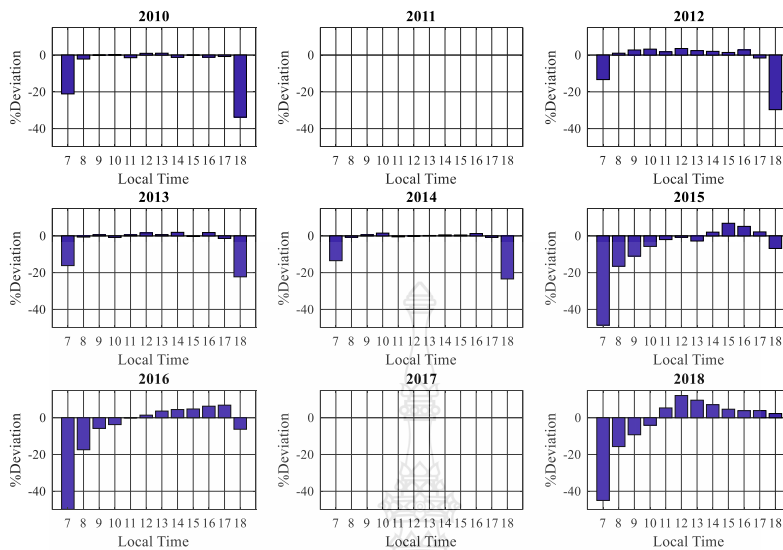
4.2.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีชุมพรเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016



รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (บน) IRI modal-2016 (กลาง) ผลต่าง(ล่าง) ที่สถานีชุมพร

รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (รูปบน) เห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. ในช่วงกลางวันมีค่ามากที่สุดเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และเริ่มมีค่าลดลงในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 18.00 น. ค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดเท่ากับ 2.16 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.59 เมกะเฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วงปี 2015 ซึ่งเป็นปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) ที่จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดและลดต่ำลงในช่วงเวลาเดียวกับค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม (รูปล่าง) แสดงผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมและแบบจำลอง IRI-2016 สังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 มีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมอยู่ที่ 0.5 เมกะเฮิร์ตซ์ในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 17.00 น. แต่ในช่วงเวลา 7.00 น. และ 18.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมมีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016

รูปที่ 4.12 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ตั้งแต่ปี 2010 ถึง 2018 ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 18.00 น. ที่สถานีชุมพร ในปี 2011 และ 2017 ไม่มีข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บผลขัดข้อง ในช่วงเวลา 7.00 น. และ 18.00 น. มีค่าความคลาดเคลื่อนมากเช่นเดียวกับที่สถานีเชียงใหม่ โดยช่วงเวลาที่มีความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือเวลา 7.00 น. ของปี 2016 ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 49.85 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.07 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงเวลา 15.00 น. ในปี 2010 และ ในตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE รายชั่วโมงตั้งแต่ 7.00 น. ถึง 18.00 น. ที่สถานีชุมพร จะเห็นได้ว่าค่า foE จะมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลาเข้ามีสูงที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น. และค่าคอยลดต่ำลงของทุกปี โดยค่าสูงที่สุดเท่ากับ 3.81 เมกะเฮิร์ตซ์ที่เวลา 12.00 น. ถึง 13.00 น. ของปี 2014 ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร เปรียบเทียบกับค่าแบบจำลอง IRI-2016 จะพบว่าในฤดู March Equinox ค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากการวัดจากภาพไอโอโนแกรมมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ในทุกปี ในฤดู June Solstice ค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากการวัดจากภาพไอโอโนแกรมมีค่าน้อยกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ยกเว้นปี 2013 ถึง 2015 ที่ค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 มีค่ามากกว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจากภาพไอโอโนแกรม ในฤดู September Equinox ค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากการวัดจากภาพไอโอโนแกรมมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 เช่นเดียวกันกับฤดู December Solstice



รูปที่ 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ที่สถานีชุมพร

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร

ปี	ค่าเฉลี่ยรายปีของพารามิเตอร์ foE สถานีเชียงใหม่											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
2010	2.48	2.72	3.03	3.27	3.48	3.44	3.42	3.40	3.22	3.00	2.55	2.64
2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	2.48	2.76	3.03	3.46	3.51	3.59	3.64	3.57	3.31	2.96	2.64	2.50
2013	2.54	2.88	3.24	3.50	3.66	3.70	3.72	3.55	3.48	3.11	2.71	2.44
2014	2.49	2.86	3.25	3.50	3.74	3.81	3.81	3.68	3.48	3.12	2.75	2.50
2015	2.64	2.92	3.35	3.48	3.62	3.72	3.75	3.68	3.33	3.08	2.83	2.59
2016	2.57	2.79	3.03	3.31	3.44	3.50	3.46	3.35	3.26	3.02	2.68	2.51
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	2.48	2.58	3.03	3.24	3.12	3.04	3.16	3.19	3.16	2.98	2.68	2.30

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีชุมพร

ปี	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foE ของสถานีชุมพร							
	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
2010	3.070	3.136	3.160	3.153	3.135	3.124	3.048	3.048
2011	-	3.274	-	3.342	-	3.304	-	3.213
2012	3.143	3.422	3.365	3.409	3.310	3.311	3.110	3.202
2013	3.288	3.369	3.410	3.391	3.290	3.380	3.280	3.280
2014	3.355	3.496	3.460	3.516	3.420	3.410	3.283	3.289
2015	3.300	3.442	3.400	3.392	3.210	3.307	3.220	3.083
2016	3.235	3.264	3.030	3.225	3.135	3.145	2.900	2.958
2017	-	3.152	-	3.140	-	3.099	-	2.927
2018	3.090	3.100	2.960	3.090	-	3.062	-	2.866

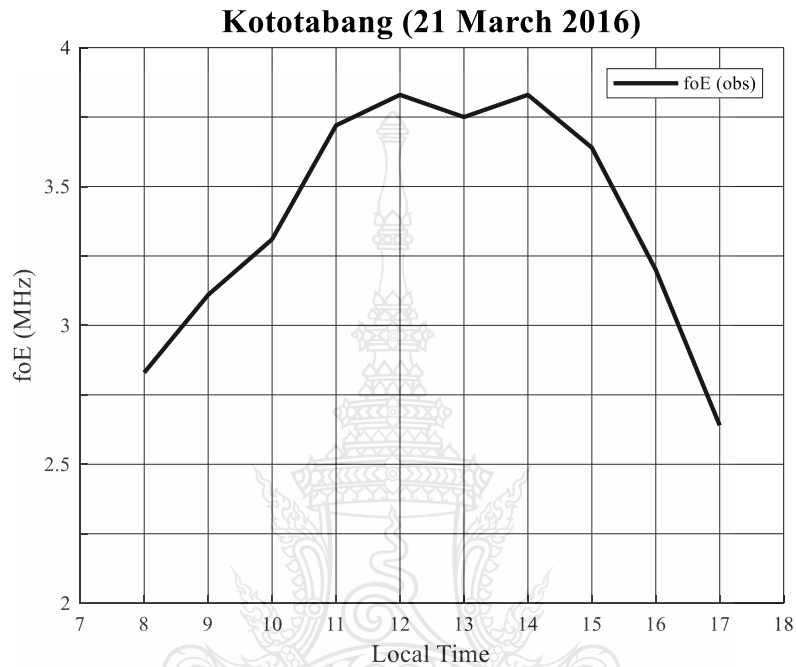
4.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น E (foE) จากค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม ตั้งแต่ปี 2010 ถึงปี 2018 ที่สถานีโกโตต้าง National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก

4.3.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้างแบบรายวัน

รูปที่ 4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 21 มีนาคม 2016 สถานีโกโตต้าง จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลา 8.00 น. จนมีค่าสูงถึงเวลา 12.00 น. มีค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 3.83 เมกะเฮิร์ตซ์ และลดต่ำลงเล็กน้อยในช่วงเวลา 13.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 3.75 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 14.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE ได้เพิ่มขึ้นอีกครั้งโดยค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 3.83

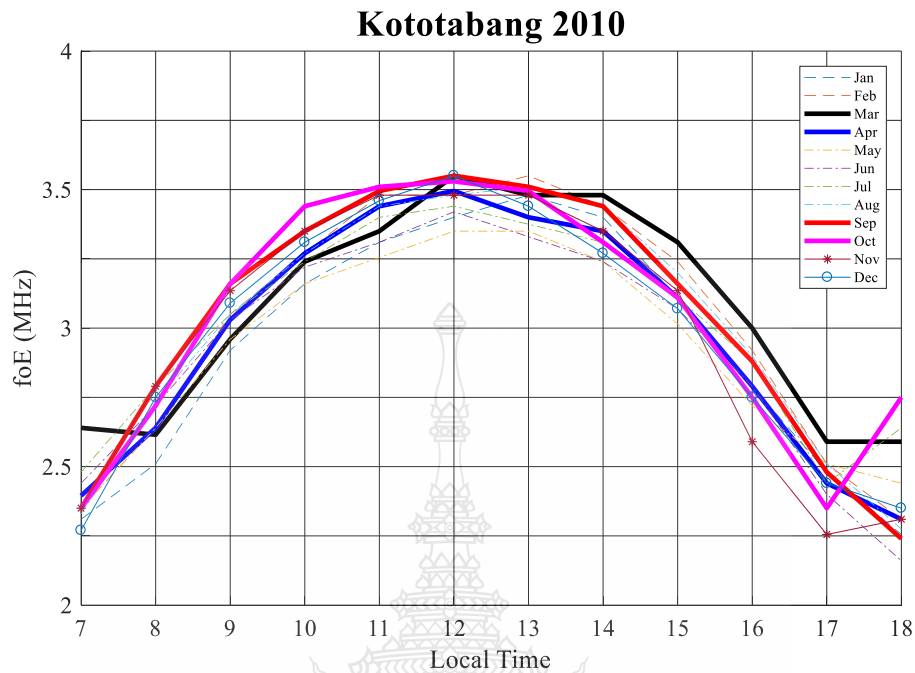
เมกะเฮิรตซ์ หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ foE ค่อยลดต่ำลงจนถึงช่วงเวลา 17.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 2.64 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ foE วันที่ 21 มีนาคม 2016 สถานีโกโตตาบัง

4.3.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตาบังแบบรายเดือน

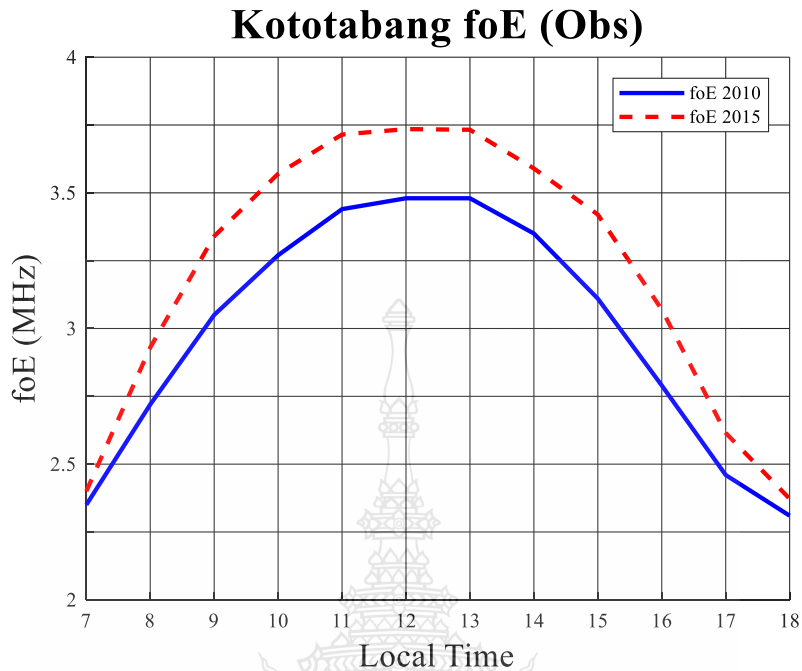
ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE แบบรายเดือนแสดงดังรูปที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่เวลา 7.00 น. จนถึงเวลา 12.00 น. มีค่ามากที่สุด ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 3.55 เมกะเฮิรตซ์ หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ foE จะเริ่มลดต่ำลงตั้งแต่เวลา 14.00 น. จนถึงเวลา 18.00 น. มีค่าต่ำที่สุดโดยมีค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 2.24 เมกะเฮิรตซ์ จะสังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE ในรายเดือนที่สถานีโกโตตาบังมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับค่าพารามิเตอร์ foE แบบรายเดือนที่สถานีชุมพรและสถานีเชียงใหม่เช่นกัน และในแต่ละเดือนมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ foE เดือนกันยายน 2010 สถานีโกโตตบบัง

4.3.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตบบังปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล

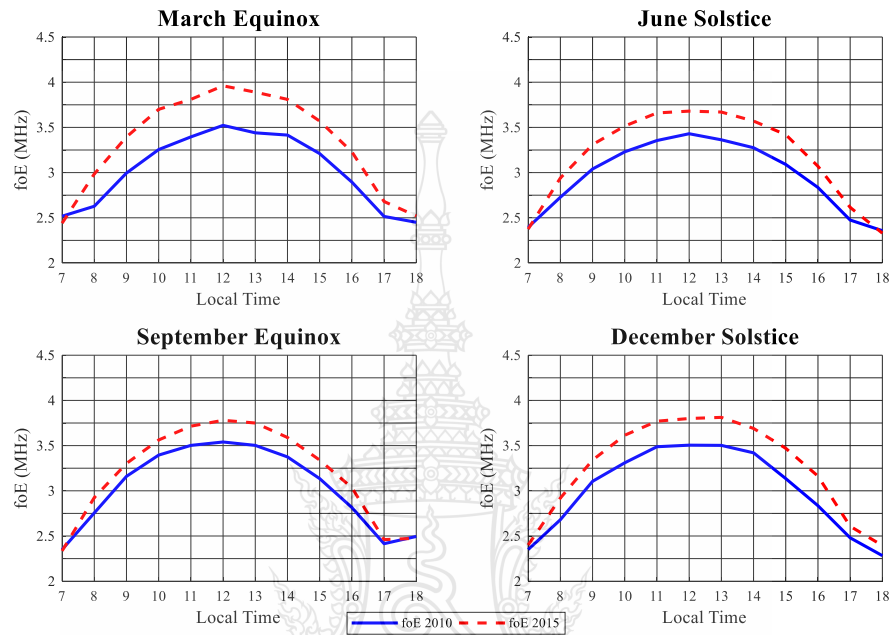
รูปที่ 4.15 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบสีน้ำเงินและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประสีแดงที่สถานีโกโตตบบัง จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. มีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และมีค่าลดลงตั้งแต่ 14.00 น. ถึง 18.00 น. ทั้งสองปี จะพบว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ foE สูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ โดยปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าความถี่วิกฤตอยู่ระหว่าง 2.37 ถึง 3.73 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าความถี่วิกฤตอยู่ระหว่าง 2.31 ถึง 3.48 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีโกโตตาบัง

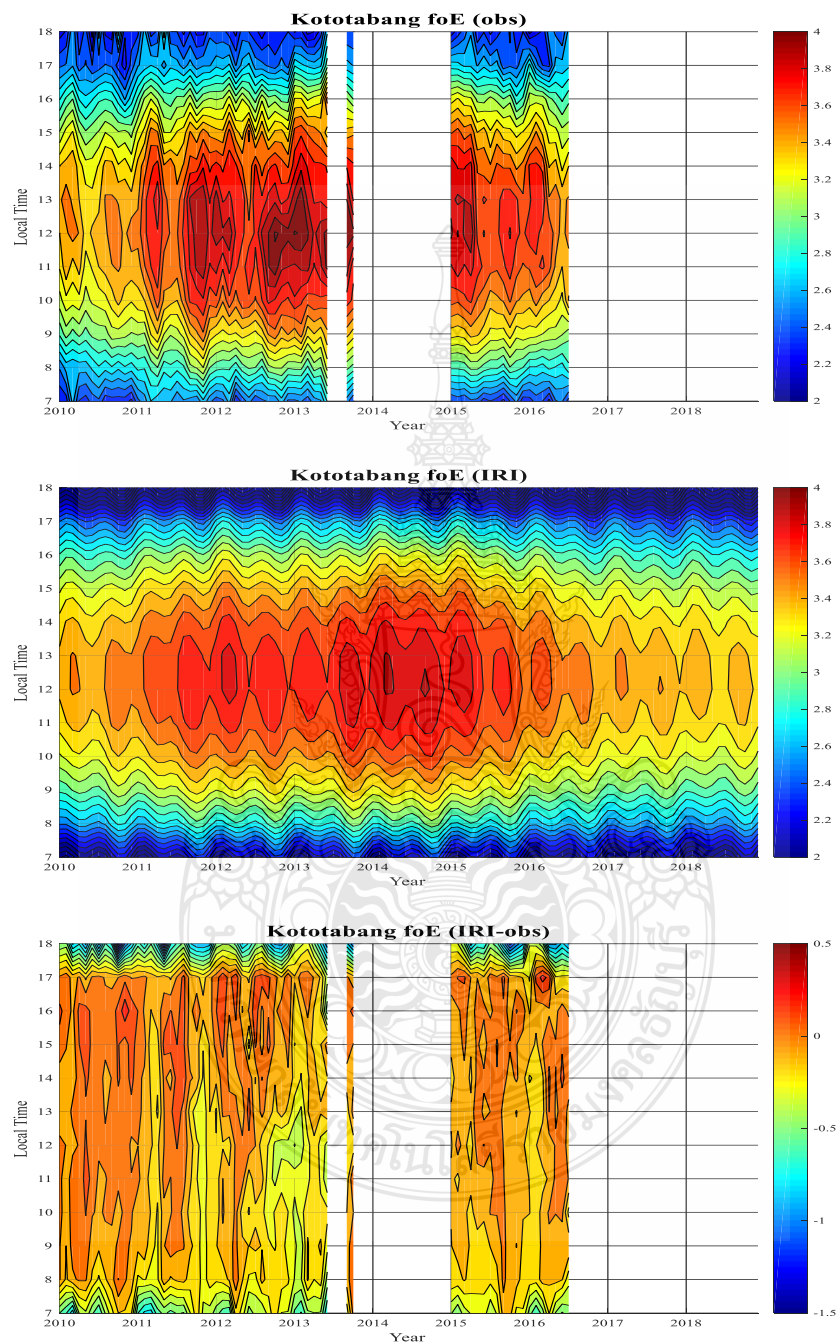
รูปที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประ แบบแบ่งฤดูกาล ที่สถานีโกโตตาบัง ที่ฤดู March Equinox มีค่าความถี่วิกฤต ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.44 ถึง 3.96 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.45 ถึง 3.52 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ฤดู June Solstice มีค่าความถี่วิกฤต ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.33 ถึง 3.68 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.35 ถึง 3.43 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ฤดู September Equinox มีค่าความถี่วิกฤต ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.33 ถึง 3.78 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.35 ถึง 3.54 เมกะเฮิร์ตซ์ และที่ฤดู December Solstice มีค่าความถี่วิกฤต ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าระหว่าง 2.39 ถึง 3.81 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าระหว่าง 2.28

ถึง 3.50 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าที่สถานีโกโตตบบังค่าความถี่วิกฤตปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง มีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำทุกฤดูกาล



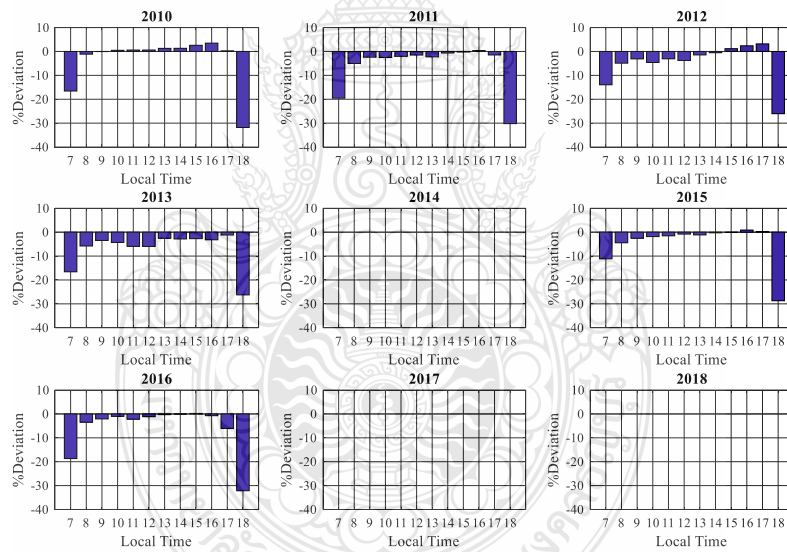
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foE ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ (2010) และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง (2015) แบบแบ่งฤดูกาล สถานีโกโตตบบัง

4.3.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE สถานีโกโตตางับเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016



รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (บน) IRI-modal (กลาง) ผลต่าง(ล่าง) ที่สถานีโกโตตางับ

รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้ (รูปบน) เห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. ในช่วงกลางวันมีค่ามากที่สุดเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และเริ่มมีค่าลดลงในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 18.00 น. ค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดเท่ากับ 2.16 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.11 เมกะเฮิร์ตซ์ อยู่ในช่วงปี 2013 เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 (รูปกลาง) ที่จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. ค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา 11.00 น. ถึง 14.00 น. และลดต่ำลงในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 18.00 น. เช่นเดียวกับค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม (รูปล่าง) แสดงผลต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม และแบบจำลอง IRI-2016 สังเกตได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 มีค่าต่ำกว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม



รูปที่ 4.18 ค่าความคลาดเคลื่อนพารามิเตอร์ foE ที่สถานีโกโตตางัง

รูปที่ 4.17 แสดงค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 18.00 น. เช่นเดียวกับสถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพร ที่ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา 7.00 น. และ 18.00 น. ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าช่วงเวลาอื่นๆ ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 32.17 เปอร์เซ็นต์ที่เวลา 18.00 น. ของปี 2016 และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 9.00 น. ของปี 2010 ใน ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE รายชั่วโมงตั้งแต่ 7.00 น. ถึง 18.00 น.ที่สถานีโกโตต้าง จะเห็นได้ว่าค่า foE จะมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลาเช้ามีสูงที่สุดอยู่ในช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 14.00 น.และค่าค่อยลดต่ำลงถึงช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดินของทุกปี โดยค่าสูงที่สุดเท่ากับ 4.03 เมกะเฮิรตซ์ที่เวลา 12.00 น. ของปี 2013 และตารางที่ 4.6 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง เปรียบเทียบกับค่าแบบจำลอง IRI-2016 จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากการวัดจากภาพไอโอโนแกรมมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ในทุกฤดูกาลและทุกปี

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง

ปี	ค่าเฉลี่ยรายปีของพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง											
	7.00	8.00	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
2010	2.35	2.72	3.05	3.27	3.44	3.48	3.48	3.35	3.11	2.79	2.46	2.31
2011	2.57	2.90	3.28	3.53	3.68	3.74	3.72	3.62	3.40	3.05	2.62	2.40
2012	2.48	2.98	3.33	3.68	3.81	3.93	3.79	3.68	3.43	3.07	2.55	2.35
2013	2.53	3.03	3.42	3.68	3.90	4.03	3.84	3.74	3.52	3.26	2.68	2.34
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	2.40	2.93	3.34	3.57	3.72	3.74	3.73	3.59	3.42	3.07	2.62	2.37
2016	2.40	2.79	3.16	3.44	3.62	3.66	3.55	3.44	3.26	3.03	2.64	2.40
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

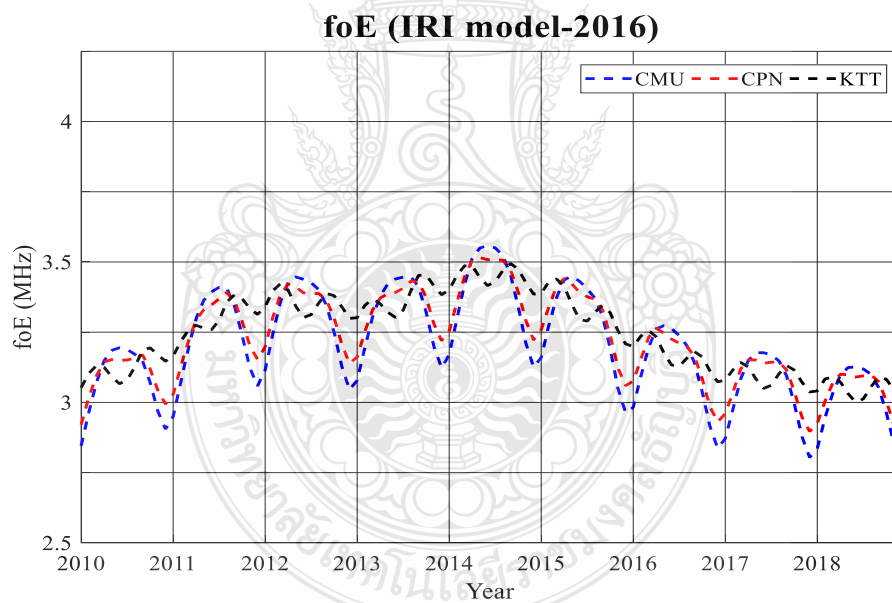
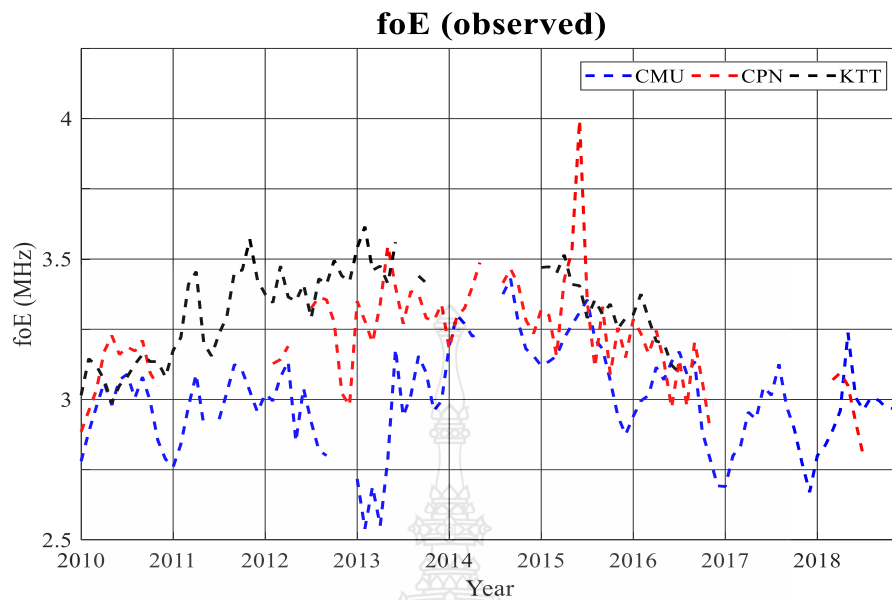
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลพารามิเตอร์ foE สถานีโกโตต้าง

ปี	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foE ของสถานีโกโตต้าง							
	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
2010	3.070	3.125	3.050	3.088	3.160	3.195	3.123	3.169
2011	3.455	3.275	3.200	3.291	3.460	3.369	3.430	3.335
2012	3.375	3.400	3.350	3.333	3.465	3.380	3.475	3.340
2013	3.475	3.352	3.488	3.339	3.440	3.454	-	3.415
2014	-	3.487	-	3.440	-	3.475	3.470	3.427
2015	3.495	3.413	3.375	3.331	3.340	3.319	3.270	3.256
2016	3.228	3.234	3.148	3.164	-	3.162	-	3.113
2017	-	3.126	-	3.076	-	3.115	-	3.072
2018	-	3.073	-	3.025	-	3.083	-	3.044



4.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE เปรียบเทียบบริเวณ EIA

ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพโอโอโนแกรม บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในพื้นที่ละติจูดต่ำโดยทำการเก็บข้อมูลจากสถานีโอโอโนซอนเดทั้งสิ้น 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ ตั้งอยู่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถานีชุมพรตั้งอยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ สถานีโกโตตาบัง National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก ทำการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงตั้งแต่ปี ค.ศ.2010 ถึงปี ค.ศ.2018 ซึ่งบริเวณ 3 สถานีดังกล่าวเป็นพื้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและบริเวณละติจูดต่ำ โดยที่สถานีชุมพรอยู่บริเวณ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก สถานีเชียงใหม่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 15 องศา และสถานีโกโตตาบัง อยู่ใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 15 องศา ดังที่ทราบกันว่าการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์จะไปทำการไอออไนซ์อนุภาคในชั้นบรรยากาศ ซึ่งบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกทำมุมใกล้กับดวงอาทิตย์ มากจึงทำให้บริเวณนี้เกิดการไอออไนซ์มากด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 4.19 (บน) แสดงค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพโอโอโนแกรม โดยเส้นประสีน้ำเงินแสดงค่าพารามิเตอร์สถานีเชียงใหม่ เส้นประสีแดงแสดง ค่าพารามิเตอร์สถานีชุมพรและเส้นประสีดำแสดงค่าพารามิเตอร์สถานีโกโตตาบัง จากการกราฟจะสังเกตเห็น ว่าค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE ที่สถานีเชียงใหม่มีค่าต่ำกว่าทั้งสองสถานี โดยที่สถานีชุมพรมีค่าเฉลี่ย พารามิเตอร์ foE สูงเป็นอันดับสองและที่สถานีโกโตตาบังมีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE สูงที่สุด เช่นเดียวกันกับ ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foE ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ที่แสดงดังรูปที่ 4.19 (ล่าง) ที่ค่าพารามิเตอร์ foE ที่ สถานีโกโตตาบังมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด สถานีชุมพรและสถานีเชียงใหม่ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าจากแบบจำลอง IRI ทำนายค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงที่สถานีเชียงใหม่และชุมพร ในขณะที่สถานีโกโตตาบังค่าจากแบบจำลอง IRI มีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง



รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม (บน) พารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 (ล่าง)

บทที่ 5

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความถี่วิกฤตของชั้น Es

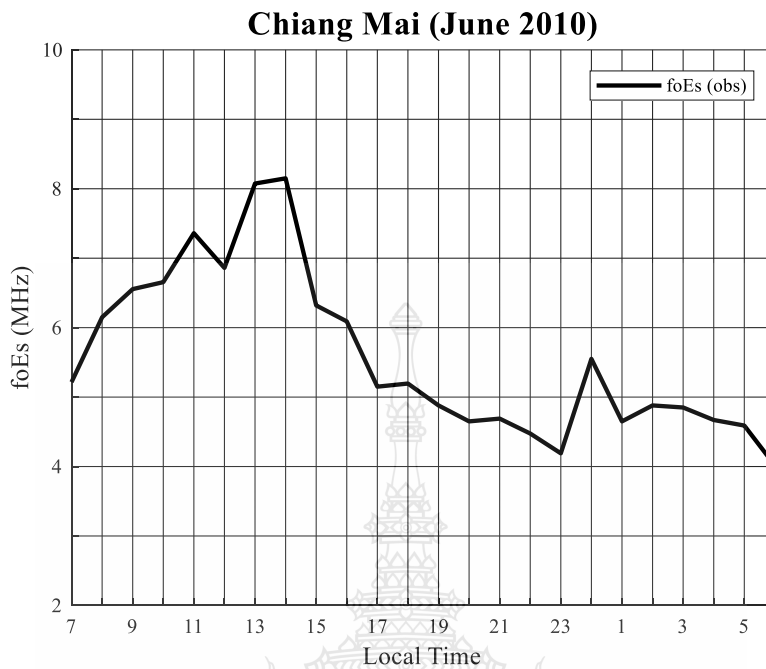
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในพื้นที่ละติจูดต่ำโดยทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนเดทั้งสิ้น 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ ตั้งอยู่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถานีชุมพรตั้งอยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ สถานีโกโตตาบัง National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก ทำการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงตั้งแต่ปี ค.ศ.2010 ถึงปี ค.ศ. 2018 โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ รายเดือน รายปี รายฤดูกาล ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ (ค.ศ.2010) และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง (ค.ศ.2015) และทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016

5.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น Es (foEs) จากค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมที่สถานีเชียงใหม่ตั้งอยู่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก

5.1.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่แบบรายเดือน

ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs ทุกช่วงเวลา เนื่องจากความผิดปกติในชั้นบรรยากาศ E สามารถเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาทั้งกลางวันและกลางคืน ไม่สามารถคาดการณ์การเกิดได้ ในหัวข้อนี้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs แบบรายเดือน โดยการนำข้อมูลเดือนมิถุนายน ปี 2010 มาทำการวิเคราะห์



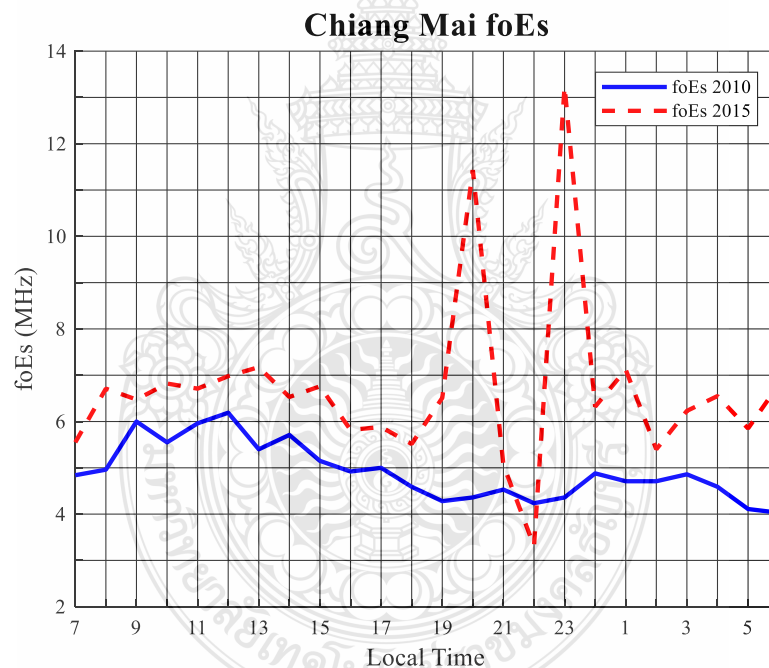
รูปที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 สถานีเชียงใหม่

รูปที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 ที่สถานีเชียงใหม่ จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foEs จะมีค่าสูงช่วงเวลากลางวันและลดลงในช่วงเวลากลางคืน โดยค่าความถี่วิกฤตในช่วงเวลากลางวันมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.15 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดที่เวลา 14.00 น. จากนั้นลดลงต่ำที่เวลา 23.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 4.19 เมกะเฮิร์ตซ์ และพุ่งสูงขึ้นอีกครั้งที่เวลา 24.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 5.55 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นค่าลดลงจนถึงช่วงเวลาเช้า

5.1.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล

รูปที่ 5.2 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประที่สถานีเชียงใหม่ จากกราฟจะเห็นได้ว่าในปี 2010 ค่าพารามิเตอร์ foEs เริ่มมีค่าสูงขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นและมีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 น. และลดต่ำลงเล็กน้อยที่เวลา 19.00 น. หลังจากนั้นก็มีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลา 24.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foEs ปี

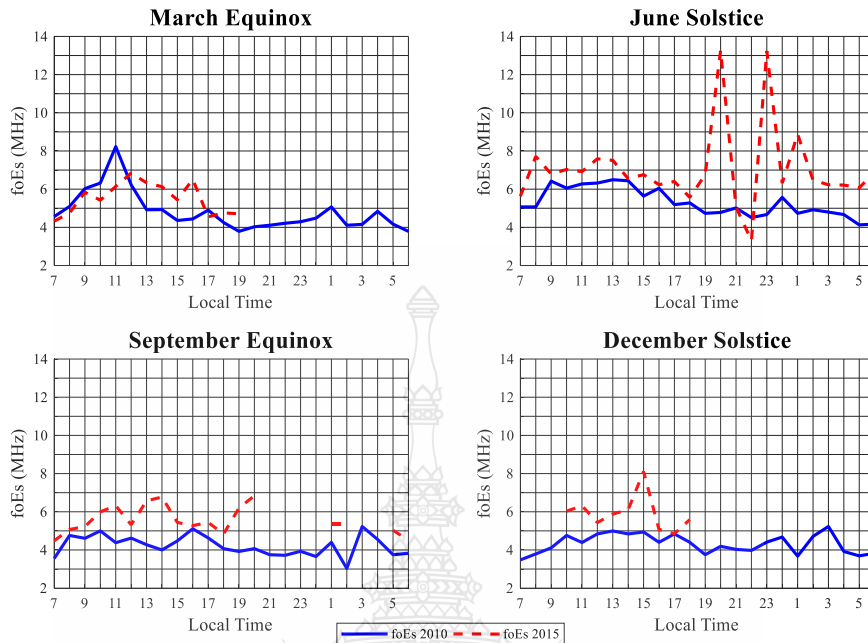
2010 เวลากลางวันมีค่ามากกว่าเวลากลางคืน โดยค่าความถี่วิกฤตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 6.19 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นในเวลากลางวัน และค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 4.03 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น ค่าพารามิเตอร์ foEs ปี 2015 ช่วงเวลากลางวันมีค่าอยู่ที่ 5 ถึง 7 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าลดต่ำลงสุดที่เวลา 22.00 น. และเพิ่มสูงขึ้นไปสุดที่เวลา 23.00 น. โดยค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 3.31 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 13.23 เมกะเฮิร์ตซ์ จากการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงจะพบว่าค่าพารามิเตอร์ foEs ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีเชียงใหม่

ภาพที่ 5.3 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล ที่สถานีเชียงใหม่ ที่ฤดู March Equinox

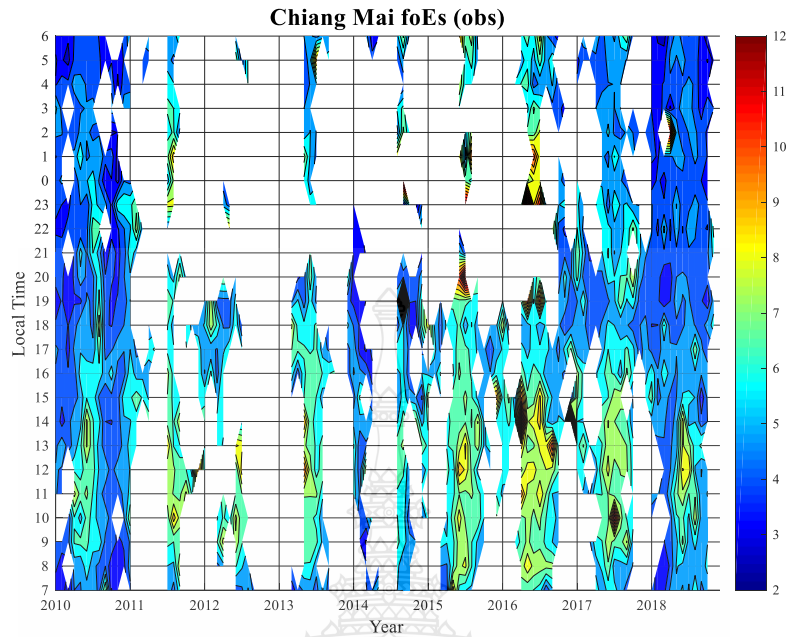
ค่าพารามิเตอร์ foEs ปี 2010 พบได้ทั้งเวลากลางวันและกลางคืน ค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่าสูงสุดที่เวลา 11.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าเท่ากับ 8.23 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 3.79 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง พบได้ช่วงเวลากลางวันเท่านั้น โดยค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่าสูงสุดที่เวลา 12.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.84 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.32 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ฤดู June Solstice ค่าพารามิเตอร์ foEs พบได้ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนทั้งปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง โดยค่าพารามิเตอร์ foEs ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำอย่างเห็นได้ชัด ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.49 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.13 เมกะเฮิร์ตซ์ และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 13.27 เมกะเฮิร์ตซ์ พบในช่วงเวลากลางคืน ค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.31 เมกะเฮิร์ตซ์ พบในช่วงเวลากลางคืนเช่นกัน ที่ฤดู September Equinox ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำพบได้ทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืน โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.23 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.03 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงพบได้ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนบางช่วงเวลา โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.84 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.48 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าพารามิเตอร์ foEs มากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ ที่ฤดู December Solstice ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำพบได้ทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืน โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.23 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.48 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงพบได้แค่ช่วงเวลา 10.00 น. ถึง 18.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.11 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.19 เมกะเฮิร์ตซ์ จากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าพารามิเตอร์ foEs มากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ



รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีเชียงใหม่

5.1.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีเชียงใหม่

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น Es (foEs) จากภาพไอโอโนแกรม ตั้งแต่ปี 2010 ถึงปี 2018 ที่สถานีเชียงใหม่ ตั้งอยู่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก รูปที่ 5.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้ทุกช่วงเวลาที่สถานีเชียงใหม่จะเห็นได้ว่าช่วงปีที่เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติในชั้น E ทั้งเวลากลางวันและกลางคืนเกิดในปี 2010 2017 และ 2018 ส่วนช่วงปี 2011 ถึง 2016 จะเกิดขึ้นในเวลากลางวัน โดยค่าความถี่วิกฤตเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2 ถึง 8 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าความถี่วิกฤตมากที่สุดเท่ากับ 19.31 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นในปี 2014 ค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดมีค่า 2.48 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม สถานีเชียงใหม่

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่

ปี	ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่			
	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)	เวลากลางวัน (07.00-17.00)	เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)	เวลากลางคืน (20.00-04.00)
2010	4.023	4.880	4.275	4.543
2011	5.113	6.170	5.360	5.723
2012	5.220	5.968	4.820	5.230
2013	5.110	6.308	5.735	5.385
2014	4.400	5.190	4.030	4.190
2015	6.350	6.235	5.860	6.230
2016	5.608	6.515	5.535	5.760
2017	4.693	6.190	4.880	5.110
2018	3.995	5.190	4.650	4.460

ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่

ปี	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่			
	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)	June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)	September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)	December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)
2010	4.230	5.230	4.350	4.820
2011	4.980	6.380	6.440	6.015
2012	5.435	6.015	6.150	4.880
2013	5.183	6.110	5.280	4.280
2014	4.480	5.570	5.480	5.315
2015	5.440	6.653	5.410	5.920
2016	6.480	6.755	5.190	5.360
2017	4.800	5.838	5.800	4.480
2018	4.570	5.060	4.480	5.555

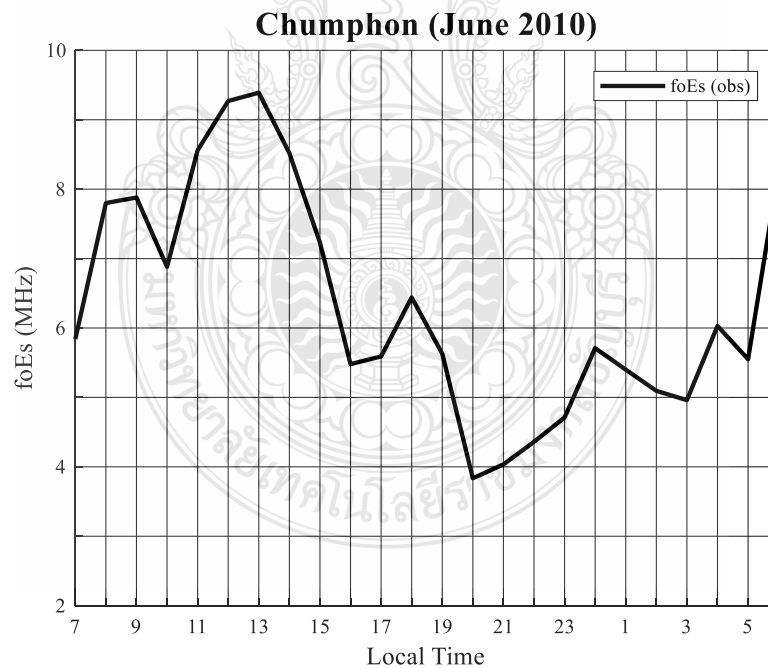
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีเชียงใหม่ ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น 05.00 น. ถึง 06.00 น. ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs มีค่าระหว่าง 4 ถึง 6 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงเวลากลางวัน 07.00 น. ถึง 17.00 น. มีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs สูงกว่าทุกช่วงเวลาของทุกปี ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกและช่วงเวลากลางคืนมีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ใกล้เคียงกัน จะสังเกตเห็นได้ในปี 2010 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs มีค่าต่ำกว่าทุกปี และปี 2015 ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs จะสูงกว่าทุกปี เนื่องจากเป็นปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง ตารางที่ 5.2 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของพารามิเตอร์ foEs ในฤดู March Equinox ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ของทุกปี มีค่าประมาณ 4.23 ถึง 6.48 เมกะเฮิร์ตซ์ ฤดู June Solstice ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 5.06 ถึง 6.65 เมกะเฮิร์ตซ์ ฤดู September Equinox ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.38 ถึง 6.44 เมกะเฮิร์ตซ์ และฤดู December Solstice ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.28 ถึง 5.92 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ในฤดู June Solstice มีค่าสูงกว่าทุกฤดูกาล

5.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพร

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น Es (foEs) จากค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมตั้งอยู่ที่สถานีชุมพรตั้งอยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก

5.2.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพรแบบรายเดือน

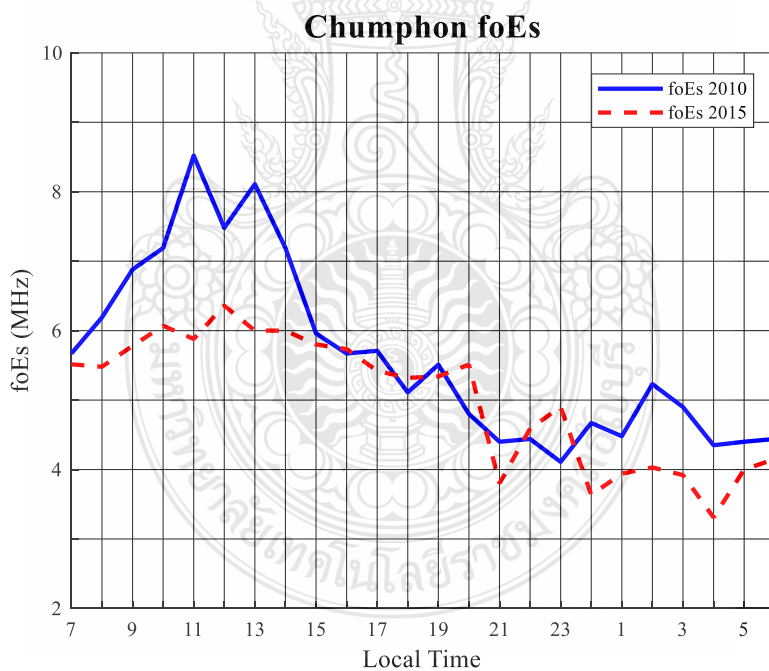
รูปที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 ที่สถานีชุมพรจากกราฟจะเห็นได้ว่าช่วงเวลากลางวันค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่ามากกว่าช่วงเวลากลางคืน โดยค่าพารามิเตอร์มีค่าสูงที่สุดที่เวลา 13.00 น. ค่าความถี่วิกฤตที่ค่าเท่ากับ 9.39 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าพารามิเตอร์ลดลงต่ำสุดที่เวลา 20.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าเท่ากับ 3.83 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นค่าพารามิเตอร์ foEs พุ่งขึ้นสูงอีกครั้งที่เวลา 06.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 8.27 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 สถานีชุมพร

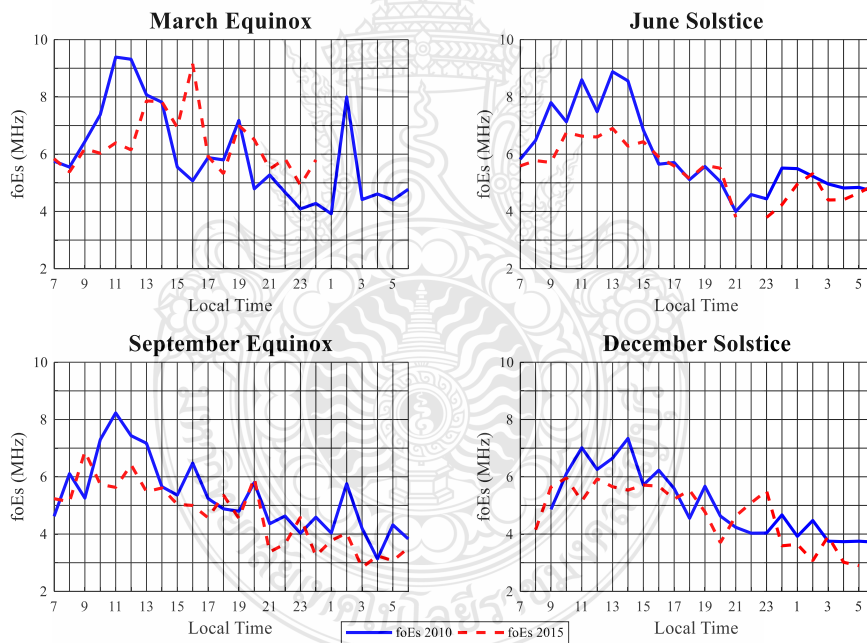
5.2.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพรปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล

รูปที่ 5.6 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำแสดงในกราฟเส้นทึบสีน้ำเงินและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแสดงในกราฟเส้นประสีแดงที่สถานีชุมพร โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.52 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นที่เวลา 11.00 น. และค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 4.11 เมกะเฮิร์ตซ์ สังเกตได้ว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่าสูงในช่วงเวลากลางวันและลดต่ำลงช่วงเวลากลางคืน เช่นเดียวกับปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 6.36 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นที่เวลา 12.00 น. และค่าความถี่วิกฤตมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 3.31 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าพารามิเตอร์ foEs สูงกว่าที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง



รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีชุมพร

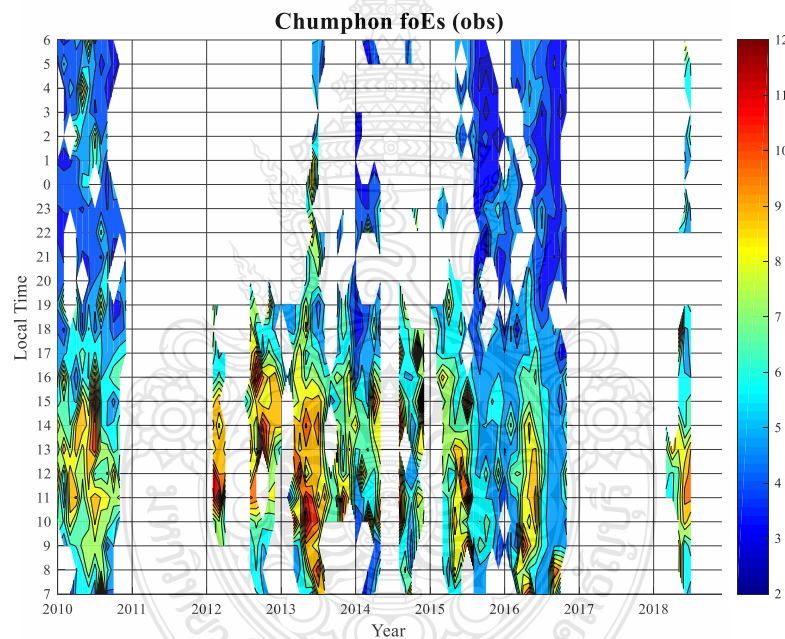
รูปที่ 5.7 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาลที่สถานีชุมพรฤดู March Equinox ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าสูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงในช่วงเวลา 8.00 น. ถึง 14.00 น. และเวลา 24.00 น. ถึง 6.00 น. แต่ในช่วงเวลา 15.00 น. ถึง 23.00 น. ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าพารามิเตอร์ foEs มากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ ในฤดู June Solstice ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 15.00 น. และ 21.00 น. ถึง 6.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าสูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง แต่ในช่วงเวลา 16.00 น. ถึง 20.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำกับปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าใกล้เคียง เช่นเดียวกับฤดู September Equinox และฤดู December Solstice



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีชุมพร

5.2.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุมพร

รูปที่ 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมที่สถานีชุมพร จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 6 ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นในช่วงเวลากลางวัน ส่วนช่วงเวลากลางคืนค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากที่สุดเท่ากับ 17.95 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดในปี 2014 และค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.51 เกิดในปี 2015 ช่วงปีที่เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติในชั้น E ทั้งเวลากลางวันและกลางคืนเกิดในปี 2010 2015 และ 2016 ส่วนปี 2011 และ 2017 ไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากความผิดปกติของเครื่องวัดสัญญาณ



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม สถานีชุมพร

ตารางที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร

ปี	ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร			
	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)	เวลากลางวัน (07.00-17.00)	เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)	เวลากลางคืน (20.00-04.00)
2010	4.320	6.523	4.940	4.463
2011	-	-	-	-
2012	5.190	7.855	6.255	5.275
2013	5.435	7.930	5.510	5.540
2014	4.380	6.380	5.590	4.190
2015	4.318	5.980	5.390	4.213
2016	4.343	5.590	4.863	4.160
2017	-	-	-	-
2018	5.550	6.920	6.070	5.670

ตารางที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร

ปี	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร			
	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)	June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)	September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)	December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)
2010	5.630	5.888	5.160	4.960
2011	-	-	-	7.110
2012	7.840	6.765	7.190	6.415
2013	7.435	7.035	5.958	5.400
2014	5.235	6.150	5.645	7.430
2015	6.150	5.840	4.938	4.995
2016	5.440	5.488	4.525	4.703
2017	-	-	-	-
2018	6.235	6.280	-	-

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพร ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระหว่าง 4.31 ถึง 5.55 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงเวลากลางวันมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.59 ถึง 7.93 เมกะเฮิร์ตซ์ ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.86 ถึง 6.25 เมกะเฮิร์ตซ์ และช่วงเลากลางคืนมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.16 ถึง 5.67 เมกะเฮิร์ตซ์ จะสังเกตได้ว่าช่วงเวลากลางวันมีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs สูงกว่าทุกช่วงเวลา ตารางที่ 5.4 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีชุมพรแสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของพารามิเตอร์ foEs ในฤดู March Equinox ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs มีค่าระหว่าง 5.23 ถึง 7.84 เมกะเฮิร์ตซ์ ฤดู June Solstice ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 5.48 ถึง 6.76 เมกะเฮิร์ตซ์ ฤดู September Equinox ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.52 ถึง 7.19 เมกะเฮิร์ตซ์ และฤดู December Solstice ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.70 ถึง 7.43 เมกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าคุณค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ในฤดู March Equinox มีค่าสูงกว่าทุกฤดูกาล

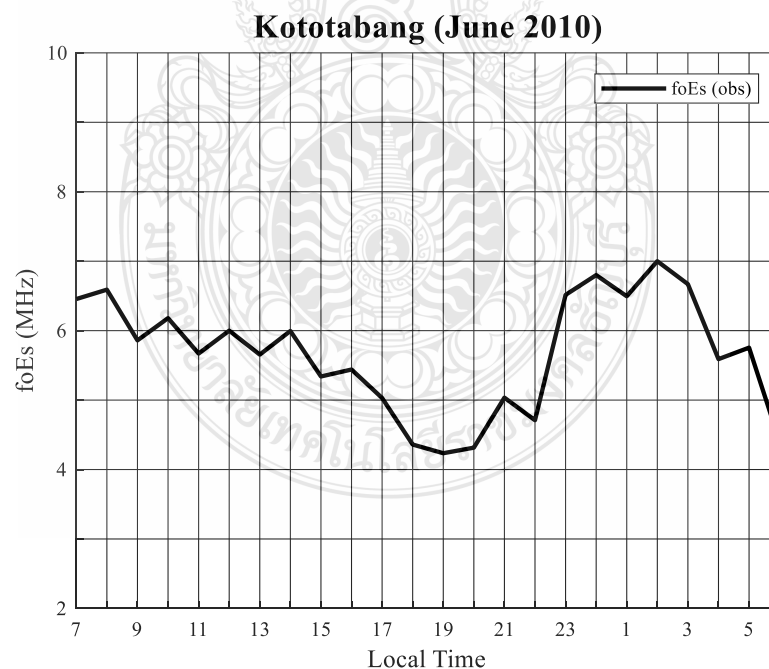


5.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตาบัง

จากการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงของความถี่วิกฤตของชั้น Es (foEs) จากค่าที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมตั้งอยู่ที่สถานีโกโตตาบัง National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก

5.3.1 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตาบังแบบรายเดือน

รูปที่ 5.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 ที่สถานีโกโตตาบัง จากกราฟจะเห็นว่าช่วงเวลากลางคืนค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่ามากกว่าช่วงเวลากลางวัน โดยค่าพารามิเตอร์ foEs ในช่วงเวลากลางวันจะสลับมีค่าสูงและต่ำและลดลงต่ำที่สุดที่เวลา 19.00 น. มีค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 4.23 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตมีค่ามากกว่าที่สุดเท่ากับ 6.8 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่เวลา 02.00 น. จากนั้นค่าพารามิเตอร์ foEs ค่อยๆลดต่ำลงจนถึงช่วงเวลา 06.00 น. ซึ่งแตกต่างจากสถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพรที่ค่าพารามิเตอร์ foEs ในช่วงเวลากลางวันจะมีค่าสูงกว่าช่วงเวลากลางคืน



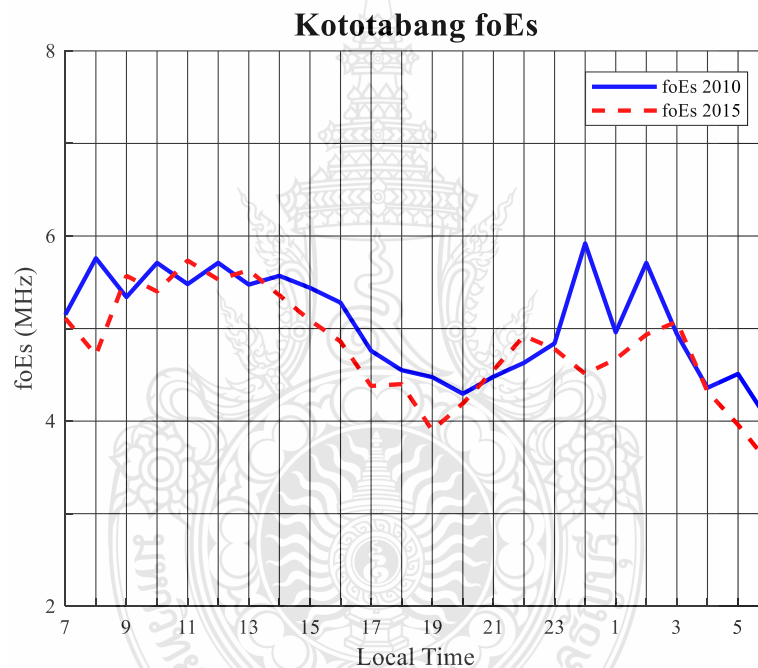
รูปที่ 5.9 ค่าพารามิเตอร์ foEs เดือนมิถุนายน 2010 สถานีโกโตตาบัง

5.3.2 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีชุกโตะตบบังปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบรายฤดูกาล

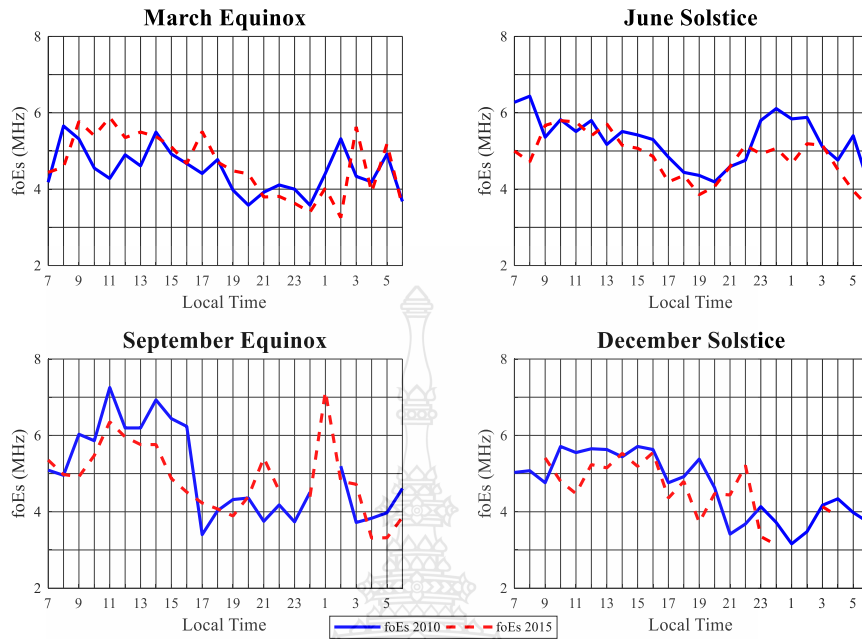
รูปที่ 5.10 แสดงเปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงที่สถานีชุกโตะตบบัง ใรปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foEs ในช่วงเวลากลางคืนมีค่ามากกว่าช่วงเวลากลางวัน โดยในช่วงเวลากลางวันค่าพารามิเตอร์ foEs จะมีค่าความถี่วิกฤตประมาณ 5.8 เมกะเฮิร์ตซ์ ตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 14.00 น. จากนั้นจะค่อยลดต่ำลงสุดที่เวลา 20.00 น. มีค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 4.29 เมกะเฮิร์ตซ์ หลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ foEs พุ่งสูงขึ้นอีกครั้งที่เวลา 24.00 น. ค่าความถี่วิกฤตมีค่าเท่ากับ 5.92 เมกะเฮิร์ตซ์ แต่ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงค่าพารามิเตอร์ในช่วงเวลากลางวันมีค่าสูงกว่าช่วงเวลากลางคืน ช่วงเวลาที่ค่าพารามิเตอร์มีค่าสูงที่สุดคือ 11.00 น. มีค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 5.73 เมกะเฮิร์ตซ์ และลดต่ำลงที่เวลา 19.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 3.9 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นค่าพารามิเตอร์ foEs ได้เพิ่มขึ้นอีกครั้งที่เวลา 3.00 น. ค่าความถี่วิกฤตเท่ากับ 4.93 เมกะเฮิร์ตซ์ จากกราฟจะเห็นได้ว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าพารามิเตอร์ foEs สูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงทุกช่วงเวลา

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล ที่สถานีชุกโตะตบบัง ฤดู March Equinox ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าพารามิเตอร์ foEs น้อยกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงช่วงเวลากลางวันและตั้งแต่เวลา 14.00 น. เป็นต้นไปจนถึง 6.00 น. มีค่าพารามิเตอร์ foEs ที่ใกล้เคียงกัน ค่าความถี่วิกฤตปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 5.65 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าสูงสุดเท่ากับ 5.88 เมกะเฮิร์ตซ์ ฤดู June Solstice ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 8.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าสูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง เวลา 9.00 น. ถึง 14.00 น. มีค่าที่ใกล้เคียงกันหลังจากนั้นปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำจะมีค่าสูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงเหมือนช่วงเช้า จากกราฟจะสังเกตเห็นได้อีกว่าค่าพารามิเตอร์ foEs ช่วงเวลากลางวันและช่วงเวลากลางคืนมีค่าที่ใกล้เคียงกันทั้งสองปี ฤดู September Equinox ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าพารามิเตอร์ foEs ช่วงเวลากลางวันสูงกว่าช่วงเวลากลางคืน ค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.25 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดเท่ากับ 3.40 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงค่าพารามิเตอร์ foEs

ช่วงเวลากลางคืนมีค่าสูงกว่าช่วงเวลากลางวัน โดยค่าความถี่วิกฤตมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 7.15 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดเท่ากับ 3.31 เมกะเฮิร์ตซ์ ฤดู December Solstice ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าพารามิเตอร์ foEs ของเวลากลางวันสูงกว่าช่วงเวลากลางคืน ส่วนปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงในช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 8.00 น. และช่วงเวลากลางคืนไม่พบค่าพารามิเตอร์ foEs โดยค่าความถี่วิกฤตสูงสุดของปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่าเท่ากับ 5.71 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่วิกฤตสูงสุดของปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าเท่ากับ 5.55 เมกะเฮิร์ตซ์



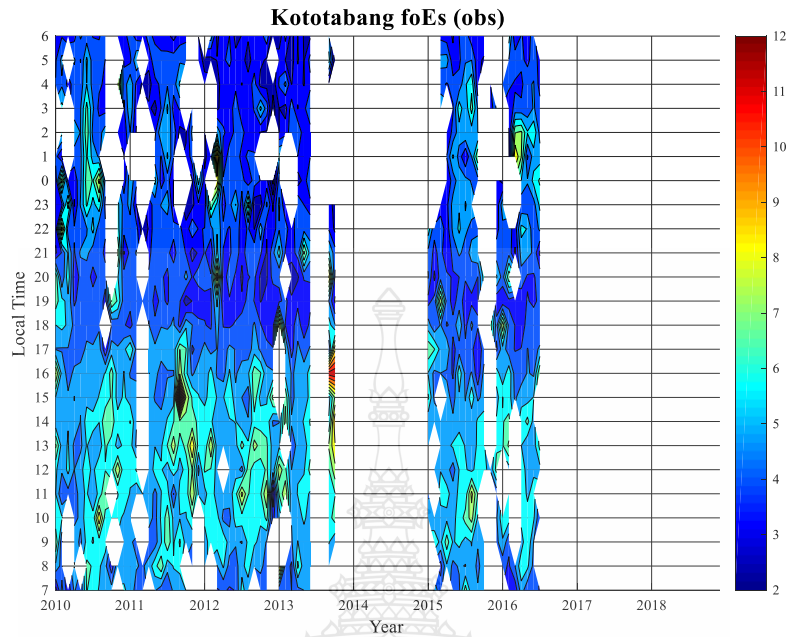
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง สถานีโกโตตาบัง



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงแบบแบ่งฤดูกาล สถานีโกโตตาบัง

5.3.3 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs สถานีโกโตตาบัง

รูปที่ 5.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้ทุกช่วงเวลาเวลาที่สถานีโกโตตาบังจะเห็นได้ว่าช่วงปีที่เกิดปรากฏการณ์ความผิดปกติในชั้น E ทั้งเวลากลางวันและกลางคืนเกิดในทุกปีแต่อาจจะไม่ปรากฏบ้างในบางช่วงเวลาหรือในบางฤดูกาล โดยค่าความหนาของอิเล็คตรอนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าความถี่วิกฤตมากที่สุดเท่ากับ 14.52 เมกะเฮิร์ตซ์ เกิดขึ้นในปี 2014 ค่าความถี่วิกฤตต่ำสุดมีค่า 2.44 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วน 2014 2017 และ 2018 ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้



รูปที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม สถานีโกโตตาบัง

ตารางที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตตาบัง

ปี	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตตาบัง			
	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)	June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)	September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)	December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)
2010	4.555	5.030	5.195	4.880
2011	4.480	4.620	5.335	4.550
2012	4.760	4.475	4.615	4.360
2013	4.400	4.805	5.690	-
2014	-	-	-	4.955
2015	4.825	4.920	4.920	4.670
2016	4.510	4.793	-	-
2017	-	-	-	-
2018	-	-	-	-

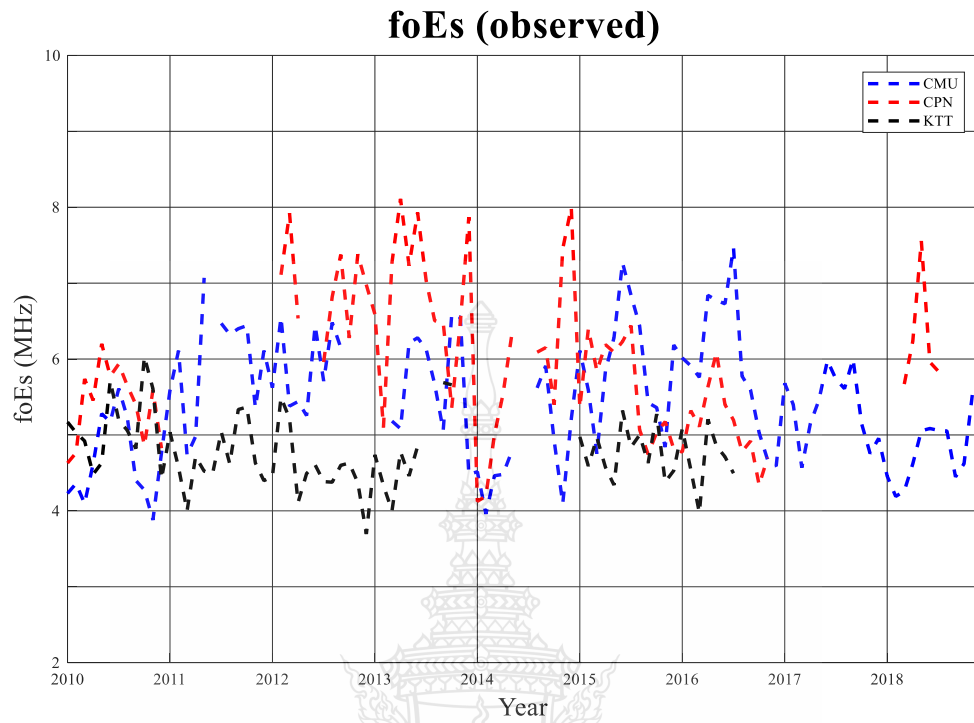
ตารางที่ 5.6 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตตราบัง

ปี	ค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตตราบัง			
	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (05.00-06.00)	เวลากลางวัน (07.00-17.00)	เวลาพระอาทิตย์ตก (18.00-19.00)	เวลากลางคืน (20.00-04.00)
2010	3.968	5.435	4.360	4.408
2011	3.755	5.415	4.215	4.163
2012	3.348	5.300	3.888	3.960
2013	3.170	5.280	3.898	3.960
2014	-	-	-	-
2015	3.843	5.340	4.235	4.495
2016	4.230	5.280	4.023	4.510
2017	-	-	-	-
2018	-	-	-	-

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าเฉลี่ยรายปีของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตตราบัง ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นค่าพารามิเตอร์ foEs มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ระหว่าง 3.17 ถึง 4.23 เมกะเฮิรตซ์ ช่วงเวลากลางวันมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 5.28 ถึง 5.43 เมกะเฮิรตซ์ ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.88 ถึง 4.36 เมกะเฮิรตซ์ และช่วงเวลากลางคืนมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.96 ถึง 4.51 เมกะเฮิรตซ์ จะสังเกตได้ว่าช่วงเวลากลางวันมีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs สูงกว่าทุกช่วงเวลา และช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs มีค่าต่ำที่สุด ตารางที่ 5.6 แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ foEs ของสถานีโกโตตราบังแสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของพารามิเตอร์ foEs ในฤดู March Equinox ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs มีค่าระหว่าง 4.40 ถึง 4.82 เมกะเฮิรตซ์ ฤดู June Solstice ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.47 ถึง 5.03 เมกะเฮิรตซ์ ฤดู September Equinox ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.92 ถึง 5.69 เมกะเฮิรตซ์ และฤดู December Solstice ค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs อยู่ที่ 4.36 ถึง 4.95 เมกะเฮิรตซ์ จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ในฤดู September Equinox มีค่าสูงกว่าทุกฤดูกาล

5.4 ผลวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs เปรียบเทียบบริเวณ EIA

ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในพื้นที่ละติจูดต่ำโดยทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนเดทั้งสิ้น 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ ตั้งอยู่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถานีชุมพรตั้งอยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ สถานีโกโตตาบัง National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก ทำการเก็บข้อมูลทุกหนึ่งชั่วโมงตั้งแต่ปี ค.ศ.2010 ถึงปี ค.ศ.2018 ซึ่งบริเวณ 3 สถานีดังกล่าวเป็นพื้นที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกและบริเวณละติจูดต่ำ โดยสถานีเชียงใหม่อยู่เหนือ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 15 องศา สถานีชุมพรอยู่บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก และสถานีโกโตตาบัง อยู่ใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 15 องศา ดังที่ทราบกันว่าการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์จะไปทำการไอออไนซ์อนุภาคในชั้นบรรยากาศ ซึ่งบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกทำมุมใกล้กับดวงอาทิตย์ มากจึงทำให้บริเวณนี้เกิดการไอออไนซ์มากด้วยเช่นกันและด้วยความผิดปกติในชั้นบรรยากาศ E มีความแปรปรวนจึงไม่สามารถคาดการณ์การเกิดล่วงหน้าได้ รูปที่ 5.13 จากกราฟจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ย พารามิเตอร์ foEs ที่สถานีชุมพรมีค่ามากที่สุด โดยที่สถานีเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ต่ำลงมาและ ที่สถานีโกโตตาบังมีค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ foEs ต่ำที่สุด



รูปที่ 5.13 พารามิเตอร์ foEs ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม



บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เทคโนโลยีการสื่อสารส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้การสื่อสารแบบไร้สายทำให้เราสามารถติดต่อหรือเชื่อมต่อข้อมูลกันได้ในระยะไกล ตั้งแต่ในอดีตจนมาถึงในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการสื่อสารไร้สายอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการสื่อสารทางไกลผ่านคลื่นวิทยุโดยการสะท้อนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ได้มีการศึกษากันอย่างแพร่หลายถึงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการสะท้อนคลื่นวิทยุ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งพารามิเตอร์ที่เลือกศึกษาได้แก่ ค่าความถี่วิกฤตของชั้น E (foE) และค่าความถี่วิกฤตของชั้น Es (foEs) ได้มาจากการทำการวิเคราะห์ภาพไอโอโนแกรมของเทคนิคไอโอโนซอนด์ โดยทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 1 ชั่วโมง 3 สถานี ได้แก่ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออกและ National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) ประเทศอินโดนีเซีย ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่ เดือนมกราคม พ.ศ.2553 ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยจะทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ foE ทั้ง 3 สถานีกับแบบจำลอง IRI-2016 และปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูง

ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ foE ทำการวิเคราะห์ช่วงเวลา 7.00 น. ถึง 18.00 น. จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ foE จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นเวลา 7.00 น. ถึง 10.00 น. มีค่าสูงที่สุดที่ช่วงกลางวันเวลา 11.00 น. ถึง 13.00 น. และหลังจากช่วงเวลา 14.00 น. ค่าพารามิเตอร์ foE เริ่มมีค่าต่ำลงจนถึงช่วงพระอาทิตย์ตกเวลา 18.00 น. โดยมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้สอดคล้องกันทั้ง 3 สถานี จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลตั้งแต่ปี 2010 ถึง 2018 จะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE ที่สถานีโกโตตาดังมีค่าสูงที่สุด สถานีชุมพรและสถานีเชียงใหม่มีค่าพารามิเตอร์ foE ลดลงตามลำดับ เมื่อนำผลที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรมเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 พบว่าค่าพารามิเตอร์ foE จากแบบจำลอง IRI-2016 ที่สถานีโกโตตาดังมีค่าสูงที่สุด ต่อมาเป็นสถานีชุมพรและสถานีเชียงใหม่ ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับ

ค่าพารามิเตอร์ foE ที่วัดได้จากภาพไอโอโนแกรม ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ foE ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงพบว่าค่าพารามิเตอร์ foE ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่าพารามิเตอร์ foE สูงกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ ทั้ง 3 สถานี จึงสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ foE มีค่าแปรผันตามจุดดับบนดวงอาทิตย์ซึ่งส่งผลต่อการสะสมอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ ถ้าเราต้องการรับ-ส่งคลื่นวิทยุในชั้น E ช่วงความถี่ที่ดีที่สุดคือ 2 ถึง 4 เมกะเฮิรตซ์และสามารถรับ-ส่งคลื่นวิทยุได้ดีในเวลากลางวัน

ผลวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ foEs ทำการวิเคราะห์ทุกๆ ชั่วโมง พบว่าค่าพารามิเตอร์ foEs จะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นและมีค่าลดลงในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดิน ในช่วงเวลากลางคืนสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ foEs ได้เนื่องจากการการสะสมอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศยังคงหลงเหลืออยู่ เมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ foEs ทั้ง 3 สถานี พบว่า ที่สถานีชุมพรมีค่าพารามิเตอร์ foEs มากที่สุด โดยที่สถานีเชียงใหม่มีค่าพารามิเตอร์ foEs ต่ำลงมาและสถานีโกโตดาบังมีค่าพารามิเตอร์ foEs ต่ำที่สุด ต่อมาได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ foEs ในปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำและปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงพบว่าค่าพารามิเตอร์ foEs พบว่าที่สถานีเชียงใหม่ค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ ที่สถานีชุมพรค่าพารามิเตอร์ foEs ปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าต่ำมีค่ามากกว่าปีที่เกิดปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ที่มีค่าสูงเช่นเดียวกับสถานีโกโตดาบัง จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่ชั้น E จะเกิดกลุ่มอิเล็กตรอนรวมตัวกันหนาแน่นทำให้ส่งผลต่อการสะท้อนของคลื่นวิทยุ ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยพารามิเตอร์ดังกล่าวในบริเวณนี้ ซึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบการสื่อสารระยะไกล งานด้านวิศวกรรมและองค์กรต่างๆ เช่น กิจการโทรคมนาคมทางทหาร ความถี่ที่ใช้ในการเดินเรือหรือทำอากาศยาน กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะของการทำวิทยานิพนธ์นี้ ควรมีการพัฒนาโปรแกรมการเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการเก็บค่าพารามิเตอร์ และเพื่อลดระยะเวลาในการเก็บค่าพารามิเตอร์ ควรทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในบริเวณอื่นจากหลายๆ สถานีเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์แต่ละพื้นที่

บรรณานุกรม

- [1] T. Onkoh, and K. Marubashi, Science of space environment, Ohmsha, Ltd., Japan, 2001.
- [2] N. Wakai, H. Ohyama, and T. Koizumi, "Example of typical ionogram," Manual of Ionogram Scaling Third Version, 1987
- [3] A.D.Danilov and A.V. Konstantinova, "Diurnal and seasonal variations in long-term changes in the E-layer critical frequency," Journal of Advance in Space Research, Vol. 63, 2019 pp. 359-370.
- [4] M.G. Mostafa, H. Haralambous, and C. Oikonomou, "Statistical ionospheric E layer properties measured with the Cyprus digisonde and comparison with IRI predictions," Journal of Advance in Space Research, Vol. 61, 2018, pp. 337-347.
- [5] E.O. Somoye, E.O. Onori, and A.O. Akala, " Comparison of foE and M(3000)F2 variability at Ibadan, Singapore and Slough," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 92, 2013, pp. 18-22.
- [6] O.E. Abe, A.B. Rabiou, and J.O. Adeniyi, "Variability of foE in the equatorial ionosphere with solar activity," Journal of Advance in Space Research, Vol. 51, 2013, pp. 69-75.
- [7] N.Y. Zaalov and E.V. Moskaleva, "Statistical analysis and modelling of sporadic E layer over Europe," Journal of Advance in Space Research, Available in 2019.
- [8] J. Niu, L.B. Weng, and H.X. Fang, "An attempt to inverse the ionospheric sporadic-E layer critical frequency based on the COSMIC radio occultation data," Journal of Advance in Space Research, Vol. 63, 2019, pp. 1204-1213.
- [9] J. MacDougall, M.A. Abdu, and I. Batista, "Conjugate sporadic-E measurements," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 71, 2009, pp. 1333-1339.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] P.Sauli, and A. Bourdillon, "Height and critical frequency variations of the sporadic-E layer at midlatitudes," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 70, 2008, pp. 1904-1910.
- [11] P. Wongcharoen, P. Kenpankho, P. Supnithi, M. Ishii and T. Tsugawa, "Comparison of E layer critical frequency over the Thai station Chumphon with IRI," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 55, 2015, pp. 2131-2138.
- [12] M. Ishii, "Japanese space weather research activity," *Journal of space weather*, Vol. 15, 2017, pp. 26-35.
- [13] K. Davies. *Ionospheric Radio*. London : Peter Peregrinus, Ltd. 1990.
- [14] D. Bilitza. *International Reference Ionosphere 1990*. National Space Science Data Center, Report 90-22, Greenbelt, Maryland, USA, 1990.
- [15] 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.
- [16] M. Mozert, R. Ezquer, and C. Jadur, "On the critical frequency and height of the E layer peak at noon," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 25, 2000, pp. 69-72.
- [17] R. Atici and S. Sagir, "the effect of QBO on foE," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 20, 2017, pp. 357-362.
- [18] A.A. Nusinov, "Seasonal-latitudeinal variations of ionospheric E-layer critical frequencies dependence on solar activity in empirical models," *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 37, 2006, pp. 433-436.
- [19] Z. Yang, N. Ssessanga, L.T. Tran, D. Bilitza, and P. Kenpankho "On improvement in representation of foE in IRI" *Journal of Advance in Space Research*, Vol. 60, 2017, pp. 347-356.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] P. Wongcharoen, P. Kenpankho, P. Supnithi, M. Ishii and T. Tsugawa, “Comparison of E Layer critical frequency over the Thai station Chumphon with IRI,” Journal of Advance in Space Research, Vol. 55, 2015, pp. 2131-2138.
- [21] Tadanori Ondoh and Katsuhide Marubashi eds. Science of Space Environment. Tokyo : Ohmsha, Ltd. 2000.
- [22] Spaceweatherlive “Solar Cycle progression” [Online]. Available : <https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle/lonogram>.
- [23] นรเสฏฐ์ วิชัยพานิชย์. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟคเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ บริเวณละติจูดต่ำ” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- [24] Seasonal “การเกิดฤดูกาล” [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/darasastrsirirat/services>
- [25] IRI-model “International Reference Ionosphere” [Online]. Available : <http://irimodel.org>
- [26] NICT “SouthEast Asia Low-latitude IOnospheric Network (SEALION)” [Online]. Available : <https://aer-nc-web.nict.go.jp/sealion/>
- [27] Oocities “ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (The Ionosphere)” [Online]. Available : http://www.oocities.org/ten_2548/chapter8.html
- [28] 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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [29] IRI-model “International Reference Ionosphere - IRI (2016) with IGRF-13 coefficients”
[Online]. Available : https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php
- [30] Sun spot “จุดดับบนดวงอาทิตย์” [Online]. Available : <https://www.bbc.com/thai/features-45463515>
- [31] wikipedia “Ionosphere Layer” [Online]. Available :
<https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:IonosphereLayers-IT.gif>



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 1) T. Yooprasopchok, N. Wichaipanich, K. Hozumi, “**Variations of foE and foEs During Low and High Solar Activity Over Equatorial Latitude Station, Thailand**” 2019 11th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), pp.267-271, 2019.
- 2) T. Yooprasopchok, N. Wichaipanich, K. Hozumi, “**Comparison of foE between Observed Data and IRI-2016 Model Predictions at Conjugate Points over Southeast Asia region**” 2020 17th International Conference on Electrical Engineering Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON), pp.189-192, 2020.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวธนพร อยู่ประสพโชค
วัน เดือน ปีเกิด	10 กุมภาพันธ์ 2535
ที่อยู่	100/27 หมู่ 2 ตำบลประจันตคาม อำเภอประจันตคาม จังหวัด ปราจีนบุรี 25130
ประวัติผู้เขียน	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกรออกแบบและปรับปรุงสัญญาณโทรศัพท์ บริษัท ฟิฟตี้ไฟร์กรุ๊ป จำกัด พ.ศ. 2557 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	092-356-2552
อีเมล	thanaporn_y@en.rmutt.ac.th

