

การเปรียบเทียบความสูงสูงสุดของชั้นเอฟสองของชั้นบรรยากาศ  
ไอโอโนสเฟียร์ (hmF2) ที่ได้จากไอโอโนซอนด์กับแบบจำลอง IRI-2016  
บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

COMPARISON OF IONOSPHERIC F2-LAYER PEAK HEIGHT  
DERIVED BY IONOSONDE WITH IRI-2016 MODEL OVER  
SOUTHEAST ASIA

ศักรภรณ์ เขื่องสตุง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การเปรียบเทียบความสูงสูงสุดของชั้นเอฟสองของชั้นบรรยากาศ  
ไอโอโนสเฟียร์ (hmF2) ที่ได้จากไอโอโนซอนด์กับแบบจำลอง IRI-2016  
บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้



ศักรภรณ์ เขื่องสตุ่ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism



.....  
.....


(นายศักรภรณ์ เขื่องสตุ้ง)

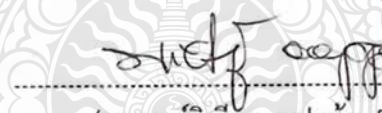
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การเปรียบเทียบความสูงสูงสุดของชั้นเอฟสองของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (hmF2) ที่ได้จากไอโอโนซอนด์กับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้  
Comparison of Ionospheric F2-Layer Peak Height (hmF2) Derived by Ionosonde with IRI-2016 Model Over Southeast Asia

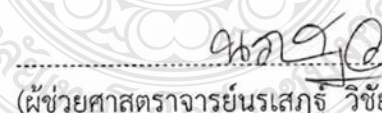
ชื่อ - นามสกุล      นายศักรภรณ์ เชื่องสงุง  
สาขาวิชา      วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.  
ปีการศึกษา      2564

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

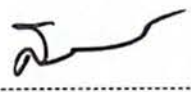
  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เคนพันค้อ, วศ.ด.)

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

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)  
วันที่ 29 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2565

**หัวข้อวิทยานิพนธ์** การเปรียบเทียบความสูงสูงสุดของชั้นเอฟสองของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (hmF2) ที่ได้จากไอโอโนซอนด์กับแบบจำลอง IRI-2016 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

Comparison of ionospheric F2-layer peak height (hmF2) derived by ionosonde with IRI-2016 model over Southeast Asia

**ชื่อ - นามสกุล** นายศักรภรณ์ เชื่องสตุ่ง  
**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า  
**อาจารย์ที่ปรึกษา** ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, วศ.ด.  
**ปีการศึกษา** 2564

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการเปรียบเทียบค่าความสูงสูงสุดของชั้นเอฟสองของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (hmF2) กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทำการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ 3 สถานีได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทยและ สถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย

ข้อมูล hmF2 ที่วัดได้จริงจากสถานีทั้ง 3 ตั้งแต่เดือนมกราคมปี ค.ศ. 2010 ถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 ถูกเปรียบเทียบกับแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือก (BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015) ของแบบจำลอง IRI-2016 เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายชั่วโมง รายวัน รายฤดูกาล รายปี รวมถึงความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาจากพระอาทิตย์ที่มีค่าต่ำ (ปี ค.ศ. 2010) และสูง (ปี ค.ศ. 2015)

จากการวิเคราะห์ผลที่วัดได้จริงจาก 3 สถานีเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกพบว่า มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ hmF2 มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น (06.00 น.) จนมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน จากนั้นระดับความสูงค่อย ๆ ลดต่ำลงเรื่อย ๆ จนถึงระดับต่ำสุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นแล้วกลับมาเพิ่มขึ้นในวันถัดไป นอกจากนี้แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง IRI-2016 ทำนายค่าต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและทำนายค่าสูงไปในช่วงเวลากลางคืน ตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่า hmF2 ของสถานีทั้ง 3 สถานีคือ ตัวเลือก SHU-2015 และ BSE-1979 ในขณะที่ตัวเลือก AMTB-2013 ให้ค่า hmF2 คลาดเคลื่อนจากข้อมูลที่วัดได้ทั้ง 3 สถานี โดยเฉพาะในเดือนธันวาคมของปี ค.ศ. 2010-2018

**คำสำคัญ:** ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ไอโอโนซอนด์ แบบจำลอง IRI-2016

Thesis Title            Comparison of ionospheric F2-layer peak height (hmF2) derived by ionosonde with IRI-2016 model over Southeast Asia

Name-Surname        Mr. Sakkrapop khuangsatung

Program                Electrical Engineering

Thesis Advisor        Assistant Professor Noraset Wichaipanich, D.Eng.

Academic Year        2021

## ABSTRACT

This thesis presents the comparison of ionospheric F2 layer peak height (hmF2) with 3 options of the IRI-2016 model, including the BSE-1979 option, the AMTB-2013 option, and the SHU-2015 option, over Southeast Asia. The collected data from 3 ionosonde stations, namely Chiang Mai and Chumphon stations, Thailand and Kototabang station, Indonesia.

The observed hmF2 data from 3 ionosonde stations during January 2010 to December 2018 are compared with 3 options (BSE-1979, AMTB-2013, SHU-2015) of the IRI-2016 model to analyze the hourly, daily, seasonally, yearly variations including the difference between low (2010) and high (2015) solar activity.

An analysis of the observed values from the 3 stations compared with the IRI-2016 model for all 3 options revealed similar trends of change in that the hmF2 increases during sunrise (06:00) to peak around midday. Then the elevation gradually decreased to the lowest level at pre-sunrise hours and then returns to increase the next day. Additionally, the 3 options of the IRI-2016 model showed that the IRI-2016 model predicted hmF2 values underestimate during daytime and overestimate during nighttime. The optimal choice for predicting hmF2 for the three stations is the SHU-2015 and BSE-1979 options, while the AMTB-2013 option gave hmF2 discrepancies from the data measured at all three stations, particularly in December of the year 2010-2018.

**Keywords:** Ionosphere, Ionosonde, IRI-2016 model

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เคนพันค้อ ประธานกรรมการสอบ และกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูริย์ รักเหลือ และ ดร.วิเชียร อุบแก้ว ที่ได้ให้ความกรุณาให้ข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเสียสละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติ (NICT) ประเทศญี่ปุ่นและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย สำหรับ อุปกรณ์ และการสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ผ่านโครงการของ SEALION

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

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากการจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้มีข้อบกพร่องหรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ศักรภณ์ เชื้อองสตุ้ง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(10)
สารบัญรูป.....	(11)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการทำวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศโลก.....	5
2.2 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง.....	6
2.3 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	6
2.4 วัฏจักรสุริยะ.....	13
2.5 การแบ่งฤดูกาล.....	15
2.6 เทคนิคไอโอโนซอนด์.....	17
2.7 แบบจำลอง IRI.....	22
บทที่ 3 วิธีการศึกษาผลการวิจัย.....	32
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	33



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สายอากาศ.....	36
3.1.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม.....	36
3.1.4 สถานีที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	36
3.2 วิธีเก็บค่าพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม.....	38
3.2.1 ตัวอย่างการเก็บค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2.....	39
3.3 วิธีการใช้โปรแกรม Special Scaling.....	44
3.4 วิธีเก็บข้อมูล IRI.....	47
3.5 การวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม MATLAB.....	48
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ ระยะทาง 3,000 กิโลเมตร และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอ โอโน เฟียร์เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016.....	50
4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของชั้นบรรยากาศไอโอ โนสเฟียร์.....	51
4.1.1 สถานีเชียงใหม่.....	51
4.1.1.1 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมง สถานี เชียงใหม่.....	51
4.1.1.2 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายวัน สถานีเชียงใหม่....	54
4.1.1.3 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบเดือน สถานีเชียงใหม่.....	56
4.1.1.4 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ hmF2 แบบราย ฤดูกาล สถานีเชียงใหม่.....	57
4.1.1.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่.....	62

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1.6 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกต ได้ hmF2 กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่....	63
4.1.1.7. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มี ปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่.....	64
4.1.2 สถานีชุมพร.....	65
4.1.2.1 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมง สถานีชุมพร...	65
4.1.2.2 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายวัน สถานีชุมพร.....	67
4.1.2.3 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบเดือน สถานีชุมพร.....	69
4.1.2.4 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ hmF2 แบบราย ฤดูกาล สถานีชุมพร.....	71
4.1.2.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีชุมพร.....	76
4.1.2.6 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกต ได้ hmF2 กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่.....	77
4.1.2.7 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มี ปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่.....	78
4.1.3 สถานีโกโตตาบัง.....	79
4.1.3.1 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมง สถานีโกโตตาบัง.....	79
4.1.3.2 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายวัน สถานีโกโตตาบัง.....	81

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.3.3 เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบเดือนสถานีโกโตตาบัง....	83
4.1.3.4 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ hmF2 แบบราย ฤดูกาลสถานี โกโตตาบัง.....	85
4.1.3.5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีโกโตตาบัง.....	90
4.1.3.6 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกต ได้ hmF2 กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่.....	91
4.1.3.7. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มี ปฏิบัติการจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่.....	92
4.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้ง 3 สถานีแบบรายปี.....	93
4.3 สรุป.....	94
	95
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก.....	101
ภาคผนวก ก.ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	107

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	สถานีไอโอโนซอนด์และตำแหน่งที่ตั้งบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้..... 21
ตารางที่ 2.2	รายชื่อคณะสมาชิกทั้งหมด..... 22
ตารางที่ 2.3	เหตุการณ์สำคัญของการปรับปรุง IRI..... 24
ตารางที่ 2.4	การประชุมเชิงปฏิบัติการของ IRI และสิ่งตีพิมพ์ IRI..... 26
ตารางที่ 3.1	พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการสังเกตโดยไอโอโนซอนเด สถานีชุมพร..... 33
ตารางที่ 4.1	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานี เชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010..... 60
ตารางที่ 4.2	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานี เชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015..... 61
ตารางที่ 4.3	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาสูงและต่ำของ สถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015..... 64
ตารางที่ 4.4	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีชุมพร ปี ค.ศ. 2010..... 74
ตารางที่ 4.5	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีเสถาณี ชุมพรในปี ค.ศ. 2015..... 75
ตารางที่ 4.6	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาสูงและต่ำของ สถานีชุมพร ในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015..... 78
ตารางที่ 4.7	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีโกโตตา บังปี ค.ศ. 2010..... 88
ตารางที่ 4.8	ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีเสถาณี โกโตตาบังในปี ค.ศ. 2015..... 89
ตารางที่ 4.9	แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาสูงและต่ำของโก โตตาบังในปี ค.ศ. 2015และปี ค.ศ. 2015..... 92

## สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์(Ionosphere).....	5
รูปที่ 2.2	แสดงขบวนการ ไอออไนเซชัน.....	7
รูปที่ 2.3	บวณการรวมตัวกันใหม่.....	8
รูปที่ 2.4	เส้นรุ้งแม่เหล็กบนแผนที่ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์.....	10
รูปที่ 2.5	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.....	11
รูปที่ 2.6	ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและเวลากลางคืน.....	13
รูปที่ 2.7	จุดดับบนดวงอาทิตย์.....	14
รูปที่ 2.8	วัฏจักรสุริยะปี 1995-2020.....	15
รูปที่ 2.9	แบ่งฤดูกาลโดยยึดตำแหน่งดวงอาทิตย์.....	17
รูปที่ 2.10	ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคไอโอโนซอนด์.....	18
รูปที่ 2.11	พารามิเตอร์ที่อ่านได้จากไอโนแกรม.....	18
รูปที่ 2.12	บริเวณที่ตั้งสถานี Ionosonde ทั่วโลก.....	20
รูปที่ 2.13	สถานีไอโอโนซอนด์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้.....	21
รูปที่ 3.1	ตำแหน่งสถานีไอโอโนซอนด์.....	32
รูปที่ 3.2	เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96029 FM/CW Radar.....	34
รูปที่ 3.3	สายอากาศชนิดโพเต็คโดโพล.....	35
รูปที่ 3.4	สายอากาศที่สถานีชุมพร ประเทศไทย.....	35
รูปที่ 3.5	แผนที่โลกที่ทำการติดตั้งบริเวณ EIA.....	37
รูปที่ 3.6	ภาพจำลองพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม.....	38
รูปที่ 3.7	ภาพจำลองของ M แพคเตอร์สไลเดอร์.....	39
รูปที่ 3.8	ภาพจำลองการใช้งานของ M แพคเตอร์สไลเดอร์.....	40
รูปที่ 3.9	ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 แบบต่าง ๆ	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.10	ลักษณะหน้าตาของโปรแกรม Special scaling.....	44
รูปที่ 3.11	การเลือกค่าพารามิเตอร์ h F, foF2 และ MUF(3000) F2 จากโปรแกรม Special scaling.....	45
รูปที่ 3.12	การเลือกสถานที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากโปรแกรม Special scaling	45
รูปที่ 3.13	การเลือกวัน เดือน และปีทำการเก็บพารามิเตอร์จากโปรแกรม Special scaling	46
รูปที่ 3.14	การเก็บวัดค่าพารามิเตอร์โดยโปรแกรม Special scaling.....	46
รูปที่ 3.15	เว็บไซต์เก็บข้อมูล IRI .....	48
รูปที่ 4.1	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายชั่วโมงของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010.....	52
รูปที่ 4.2	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบชั่วโมงของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015.....	53
รูปที่ 4.3	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายวันของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010.....	54
รูปที่ 4.4	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายวันของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015.....	55
รูปที่ 4.5	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายเดือนของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010.....	56
รูปที่ 4.6	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายเดือนของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015.....	57
รูปที่ 4.7	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010.....	58
รูปที่ 4.8	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015.....	59

## สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.9	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีเชียงใหม่	62
รูปที่ 4.10	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก AMTB-2013 ของสถานีเชียงใหม่.....	63
รูปที่ 4.11	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก SHU-2015 ของสถานีเชียงใหม่.....	63
รูปที่ 4.12	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{obs}$ เทียบกับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก ทั้ง 3 ของสถานีเชียงใหม่..	64
รูปที่ 4.13	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายชั่วโมงของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2010.....	66
รูปที่ 4.14	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบชั่วโมงของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2015.....	67
รูปที่ 4.15	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายวันของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2010.....	68
รูปที่ 4.16	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายวันของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2015.....	69
รูปที่ 4.17	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายเดือนของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2010.....	70
รูปที่ 4.18	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายเดือนของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2015.....	71
รูปที่ 4.19	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายฤดูกาลของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2010.....	72

## สารบัญญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.20	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายฤดูกาลของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2015.....	73
รูปที่ 4.21	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีชุมพร....	76
รูปที่ 4.22	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก AMTB-2013 ของสถานีชุมพร.	77
รูปที่ 4.23	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก SHU-2015 ของสถานีชุมพร...	77
รูปที่ 4.24	เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{Obs}$ เทียบกับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก ทั้ง 3 ของสถานีชุมพร.....	78
รูปที่ 4.25	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายชั่วโมงของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2010.....	80
รูปที่ 4.26	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบชั่วโมงของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2015.....	81
รูปที่ 4.27	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายวันของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2010.....	82
รูปที่ 4.28	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายวันของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2015.....	83
รูปที่ 4.29	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายเดือนของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2010.....	84
รูปที่ 4.30	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายเดือนของสถานีโกโตต้างปี ค.ศ. 2015.....	85
รูปที่ 4.31	ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายฤดูกาลของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2010.....	86



## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ แบบรายฤดูกาลของสถานีโกโตตาดั้งในปี ค.ศ. 2015.....	87
รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีโกโตตาดั้ง.....	90
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก AMTB-2013 ของสถานีโกโตตาดั้ง.....	91
รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{OBS}$ กับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก SHU-2015 ของสถานีโกโตตาดั้ง.....	91
รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{Obs}$ เทียบกับค่าพารามิเตอร์ $hmF2_{IRI}$ ตัวเลือก ทั้ง 3 ของสถานีโกโตตาดั้ง.....	92
รูปที่ 4.37 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้ง 3 สถานีแบบรายปี.....	93

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CCIR	The International Radio Consultative Committee
CMU	Chiang Mai
COSPAR	Committee On SPACe Research
COPEX	Conjugate Point Equatorial Experiment
CPN	Chumphon
EIA	Equatorial Ionization Anomaly
foE	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น E
foEs	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น Es
foF1	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F1
foF2	ความถี่วิกฤตสามัญของชั้น F2
fxF1	ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F1
fxF2	ความถี่วิกฤตวิสามัญของชั้น F2
h'E	ความสูงของชั้น E
h'F1	ความสูงของชั้น F1
h'F2	ความสูงของชั้น F2
hmF2	ความสูงสูงสุดของชั้น F2
HF	High Frequency
IRI	The International Reference Ionosphere
KTB	Kototabang
LB	ขอบเขตอ้างอิงด้านล่าง
URSI	The International Union of Radio Science
M(3000)F2	ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตรของชั้น F2
NICT National	Institute of Information and Communications Technology
Obs	Observe
SEALION	South East Asia Low-latitude Ionospheric Network

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ชั้น F คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด ( $10^5 \text{ ซม.}^{-3}$  ถึง  $10^6 \text{ ซม.}^{-3}$ ) และเป็นชั้นที่สูงที่สุด (140 กม. ถึง 1,000 กม. หรือมากกว่า) ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [1] โดยแยกออกเป็นชั้น F1 และ F2 ในเวลากลางวัน และรวมกันเป็นชั้น F ในเวลากลางคืน ชั้น F เป็นชั้นที่สำคัญที่สุดสำหรับการสื่อสารคลื่นความถี่วิทยุ (HF) เนื่องจากระดับความสูงช่วยให้มีเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดและมีอยู่ตลอด 24 ชั่วโมง และสามารถหักเหคลื่นในการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุ (HF) อย่างไรก็ตาม ความแปรปรวนของชั้น F นั้นขึ้นอยู่กับเวลา สถานที่ และกิจกรรมแสงอาทิตย์ ดังนั้น การกำหนดลักษณะเฉพาะที่แม่นยำของชั้น F2 จึงจำเป็นต่อความเข้าใจเกี่ยวกับไอโอโนสเฟียร์และการออกแบบการสื่อสารและได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับไอโอโนซอนด์

ไอโอโนซอนด์เป็นระบบเรดาร์พิเศษที่ใช้ในการวัดระดับความสูงและความถี่ของชั้น E, F1 และ F2 เทคนิคนี้ใช้เครื่องรับส่งสัญญาณวิทยุเพื่อส่งและรับในคลื่นเหตุการณ์ใกล้แนวตั้ง (NVIS) คลื่นความถี่แบบมอดูเลต คลื่นต่อเนื่อง (FM/CW) ไอโอโนซอนด์เป็นตัวรับส่งสัญญาณประเภทหนึ่งที่ส่งสัญญาณความถี่วิทยุอย่างต่อเนื่องจาก 2 MHz ถึง 30 MHz โดยเพิ่มความถี่เป็น 100 kHz/s ทุก ๆ 5 นาที สัญญาณจะสะท้อนถึงชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และส่งกลับไปยังเครื่องรับ เรียกว่า ไอโอโนแกรม (Ionogram) ภาพไอโอโนแกรมแสดงระดับความสูง ( $h'$ ) ความถี่วิกฤต ( $f_o$ ) และความถี่พิเศษ ( $f_x$ ) ของชั้น E, F1 และ F2 พารามิเตอร์จำนวนมากที่ได้รับจากไอโอโนแกรมถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อตรวจสอบแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ เช่น ความถี่วิกฤตของชั้น E ( $f_oE$ ) และความถี่วิกฤตระดับ F2 ( $f_oF2$ ) ปัจจัยการแพร่กระจายที่ระยะทาง 3,000 กม. ( $M(3000)F2$ ) , จุดสูงสุดของชั้น F2 ( $hmF2$ ) เป็นต้น

International Reference Ionosphere (IRI) เป็นหนึ่งในแบบจำลองเชิงประจักษ์เกี่ยวกับไอโอโนสเฟียร์ที่ได้รับการแนะนำอย่างกว้างขวางที่สุดเป็นแบบจำลองมาตรฐานที่ได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการวิจัยอวกาศและสหภาพวิทยาศาสตร์วิทยุระหว่างประเทศ (URSI) [2] จะทำการพัฒนาเวอร์ชันทุกปีซึ่งเวอร์ชันล่าสุดเกิดขึ้นในปี 2016 เรียกว่า แบบจำลอง IRI-2016 แบบจำลองนี้มี 3 แบบจำลองในการทำนายจุดสูงสุดของชั้น F2 ประกอบด้วยตัวเลือก BSE-1979 ตัวเลือก AMTB-2013 และตัวเลือก SHU-2015 การศึกษาที่ผ่านมาได้เปรียบเทียบข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ที่สังเกตได้กับการคาดการณ์แบบจำลอง

IRI และแสดงให้เห็นว่าค่าจุดสูงสุดของชั้น F2 ที่ทำนายโดยแบบจำลอง IRI แตกต่างจากข้อมูลที่สังเกตได้ในสถานที่ต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ในเส้นศูนย์สูตร (EIA) ซึ่งอยู่ประมาณ 15° พื้นที่เหนือและใต้ของละติจูดแม่เหล็ก สาเหตุอาจเป็นเพราะรุ่นดั้งเดิมได้รับการพัฒนาโดยใช้เครือข่ายไอโอโนซอนทั่วโลกซึ่งส่วนใหญ่ติดตั้งไว้ที่บริเวณละติจูดกลางและสูง อย่างไรก็ตาม ข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ไอโอโนสเฟียร์ในเส้นศูนย์สูตร (EIA) ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง IRI ทำให้แบบจำลอง IRI มักจะล้มเหลวในการทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์อย่างแม่นยำในพื้นที่ไอโอโนสเฟียร์ในเส้นศูนย์สูตร (EIA)

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 มีการติดตั้งไอโอโนสเฟียร์คลื่นความถี่แบบปรับความถี่ต่อเนื่อง (FM/CW) จำนวน 6 แห่งทั่วเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ สถานีชุมพรและสถานีเชียงใหม่ติดตั้งในประเทศไทยและสถานีโกโตตาบัง ติดตั้งในประเทศอินโดนีเซีย 2 สถานีติดตั้งในเวียดนามและสถานีหนึ่งในฟิลิปปินส์ ได้ทำการศึกษาศาสนาเชียงใหม่และสถานีชุมพรตั้งอยู่ใกล้กับยอดเหนือใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก และสถานีโกโตตาบังตั้งอยู่ด้านใต้ใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ไอโอโนซอนเหล่านี้ใช้ในโครงการเครือข่ายไอโอโนสเฟียร์ละติจูดต่ำในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (SEALION) ที่สนับสนุนโดยสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติ (NICT) ประเทศญี่ปุ่น SEALION เป็นเครือข่ายการสังเกตการณ์แบบไอโอโนสเฟียร์ซึ่งมี Conjugate Point Equatorial Experiment (COPEX) ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ COPEX ประกอบด้วยซีกโลกเหนือและใต้ และรอบเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก COPEX อีกแห่งอยู่ในบราซิล ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์ความแปรผันของพารามิเตอร์ hmF2 ตลอดจนการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพื่อทำนายค่า hmF2 ที่สถานีไอโอโนซอนสามแห่งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ ชุมพร เชียงใหม่ และโกโตตาบัง

ในช่วงปี 2007-2016 Zhao et al. [3] ได้ทำการศึกษาระยะเปรียบเทียบระหว่างค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 (hmF2) ที่สังเกตได้ทีมาจากสถานี ionosonde 3 แห่งในประเทศจีน ได้แก่ Mohe, Beijing, Sanya และ Wuhan เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ในปี 1987-1990 Oyekola et al. [4] ได้เสนอแบบจำลอง IRI-hmF2 สามตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 โดยเปรียบเทียบกับ hmF2 ที่สังเกตได้จากสถานีวากาดูกูตั้งอยู่ละติจูดเส้นศูนย์สูตรในบูร์กินาฟาโซ ข้อมูลที่ใช้ตั้งแต่มกราคมถึงพฤษภาคม 1986 ถึง 1990 ในช่วงปี 2000-2007 Thu et al. [5] ได้ศึกษาข้อมูล foF2 และ hmF2 จากสถานีไอโอโนซอน 2 แห่งในเวียดนาม ได้แก่ Phu Thuy และ Bac Lieu เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-hmF2 ( AMTB-2013 และ SHU-2015) สองรุ่นในช่วงกิจกรรมแสงอาทิตย์ที่สูงที่สุด (2000) และต่ำ (2007) แม้ว่าข้อมูล hmF2 เทียบกับแบบจำลอง IRI ในประเทศไทยจะเสนอโดย Wichaipanich et al.[5] อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับรุ่น IRI-2007

ในขณะที่ขาดฐาน IRI-hmF2 2016 สามารุ่นตั้งนั้น hmF2 ที่ได้รับจาก ionosonde เมื่อเทียบกับแบบจำลอง IRI-hmF2 2016 สามารุ่นจึงถูกจัดทำขึ้นในงานวิจัยในครั้งนี้ M(3000)F2 และ hmF2 ที่มีความเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ รวมถึงการเปรียบเทียบระหว่างค่า hmF2 ที่ได้จากการวัดได้จริงกับ ค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองของ IRI (International Reference Ionosphere) ส่วนงานวิจัยเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในไทย ส่วนมากจะทำการ วิเคราะห์ค่า F และการเกิดสเปรด-เอฟ เท่านั้น ส่วนการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลง ที่วัดได้จริงกับค่าที่ ค่า M(3000)F2 และ hmF2 รวมถึงการเปรียบเทียบค่า hmF2 ที่วัดทำนายได้จากแบบจำลองของ IRI

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ hmF2 ซึ่งพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฤดูกาล ตำแหน่งเส้น ศูนย์สูตรแม่เหล็ก และปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ โดยทำการเก็บข้อมูลจาก สถานีชุมพร,สถานีเชียงใหม่และสถานีโกโตตาบัง ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโดยใช้ไอโอโนซอนเดเทคนิคในการทำการเก็บวัดข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในปี 2010 ถึง ปี 2018 ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์มีค่าต่ำ (Low solar activity) นอกจากนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่วัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จาก แบบจำลองของ IRI-2016 ด้วยตัวเลือก BSE-1979 ตัวเลือก AMTB-2013 และตัวเลือก SHU-2015 โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองของ IRI ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา และวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ hmF2 โดยทำการเก็บข้อมูลที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยา เขตชุมพร ประเทศไทย ซึ่งอยู่ในบริเวณละติจูด โดยใช้ไอโอโนซอนเดเทคนิคในการเก็บวัด ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 เพื่อทำการวิเคราะห์การ เปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายเดือน ตามฤดูกาล และรายปีของพารามิเตอร์แต่ละตัว นอกจากนี้ได้ ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่ทำการวัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองของ International Reference Ionosphere (IRI) นี้มีการอัปเดตทุกปีและเวอร์ชันล่าสุดเกิดขึ้นในปี 2016 เรียกว่าโมเดล IRI-2016 โมเดลนี้มี 3 ตัวเลือกในการทำนายค่า hmF2 ประกอบด้วยตัวเลือก BSE-1979 ตัวเลือก AMTB-2013 และตัวเลือก SHU-2015 ตัวเลือก BSE-1979 โดยผลที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้จะถูกนำไปใช้ในการปรับปรุง แบบจำลองของ IRI ต่อไป

### 1.3 ขอบเขตการทำวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาความแปรผันของ hmF2 สถานีคือ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศ อินโดนีเซีย

1.3.2 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ hmF2 รายวัน รายฤดูกาล รายปีและเปรียบเทียบแบบจำลอง IRI-2016

1.3.3 วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการเปรียบเทียบระหว่าง hmF2 ที่สังเกตได้และ 3 ตัวเลือก (BSE-1979, AMTB-2013, SHU-2015) ของแบบจำลอง IRI-2016

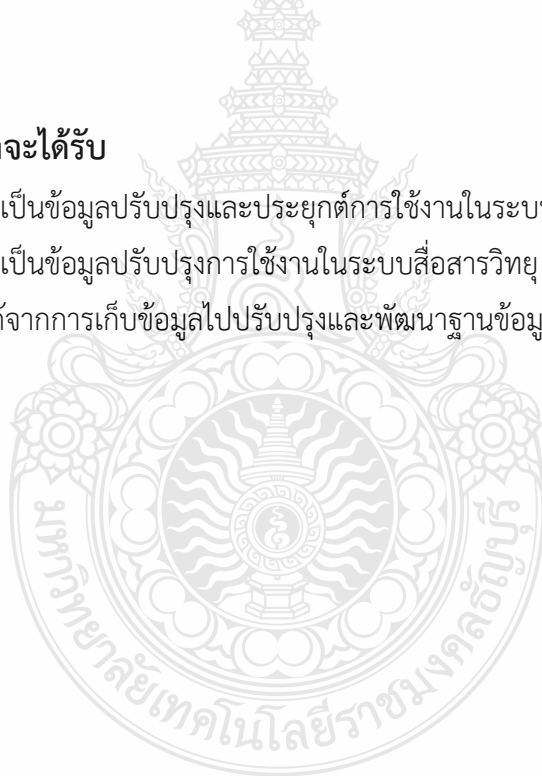
1.3.4 เก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ hmF2 เก็บข้อมูลตั้งแต่ปี 2010 ถึง ปี 2016 จาก สถานีไอโอโนซอนด์ 3 สถานีคือ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศ อินโดนีเซีย

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อนำไปเป็นข้อมูลปรับปรุงและประยุกต์การใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุคลื่นความถี่สูง

1.4.2 เพื่อนำไปเป็นข้อมูลปรับปรุงการใช้งานในระบบสื่อสารวิทยุ

1.4.3 นำผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลไปปรับปรุงและพัฒนาฐานข้อมูลของแบบจำลอง IRI



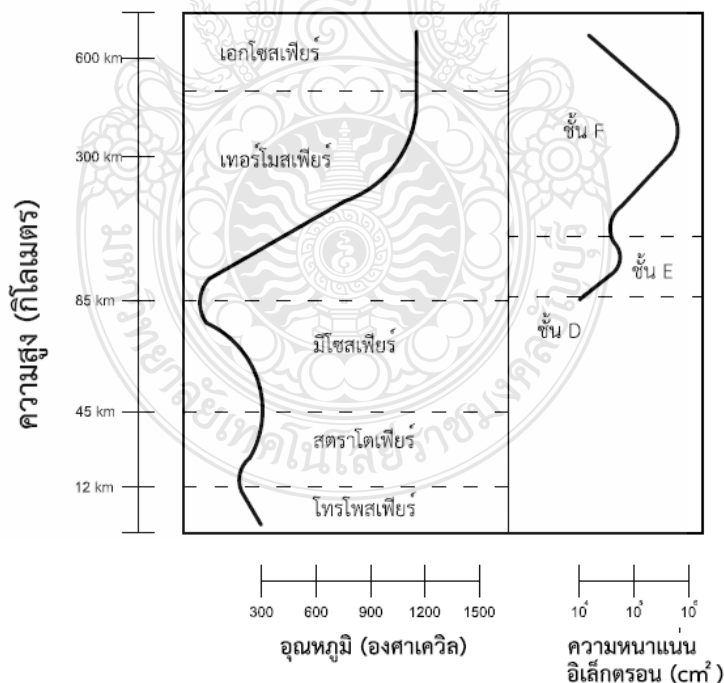
## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ hmF2 ซึ่งพารามิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ฤดูกาล ตำแหน่งเส้น ศูนย์สูตรแม่เหล็ก และปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์

#### 2.1 ลักษณะทั่วไปของชั้นบรรยากาศโลก

ชั้นบรรยากาศของโลกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทเบื้องต้น คือ ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง (Neutral Atmosphere) และชั้นบรรยากาศที่เป็นไอออไนซ์ (Ionized atmosphere) หรือเรียกอีกชื่อว่าเป็น ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยโครงสร้างของชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางสามารถจัดกลุ่มได้โดยใช้โพรไฟล์อุณหภูมิในขณะที่ชั้นบรรยากาศที่เป็น ไอออไนซ์สามารถแบ่งลักษณะได้โดยใช้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.1 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) [1]

## 2.2 ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลาง

ชั้นบรรยากาศที่เป็นกลางสามารถแบ่งได้โดยใช้โพรไฟล์อุณหภูมิ โดยแบ่งออกเป็น 4 ชั้น ใหญ่ ๆ ประกอบด้วยชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ หรืออาจเรียกว่า Boundary layer ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่เราใช้ดำรงชีวิตอยู่ โดยมีระยะความสูงเมื่อเทียบกับพื้นดินประมาณ 1-10 กิโลเมตร โดยในชั้นบรรยากาศนี้จะประกอบไปด้วยก๊าซชนิดต่าง ๆ รวมไปถึงฝุ่นละอองและมลภาวะที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ตลอดจนเมฆฝนไอน้ำ หมอก และหิมะ โดยในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศในระยะแรกจะลดลงผกผันกับความสูงที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา  $7^{\circ}\text{C}/\text{km}$  [1] และที่ระดับความสูงประมาณ 10 กิโลเมตร (ที่ตำแหน่งโทรโปพอส: Tropopause) หรือที่จุดเริ่มต้นของชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ อุณหภูมิจะมีแนวโน้มแปรตามความสูง โดยการเพิ่มของอุณหภูมิไปตามความสูงนี้ เนื่องจากโอโซนมีการดูดซับรังสี UV บางส่วนที่แผ่จากดวงอาทิตย์ ในระดับความสูงดังกล่าว ลักษณะเช่นนี้จะปรากฏจนถึงระดับความสูงที่ 50 กิโลเมตร (หรือที่ตำแหน่งสตราโตพอส Stratopause) อุณหภูมิก็จะเริ่มลดลงซึ่งแปรผกผันกับความสูงที่เพิ่มขึ้นของชั้นบรรยากาศมีโซสเฟียร์อีกครั้งและที่ระดับความสูงประมาณ 80 กิโลเมตร อุณหภูมิจะมีการลดลงอย่างฉับพลันและลดลงจนถึงระดับต่ำสุดที่ประมาณ  $92^{\circ}\text{C}$  หลังจากจุดต่ำสุดของอุณหภูมิ (หรือหลังจากตำแหน่งมีโซพอส: Mesopause) นี้แล้วอุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนมีค่าที่คงที่ที่ประมาณ  $1,200^{\circ}\text{C}$  ณ ที่ระดับความสูงของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์

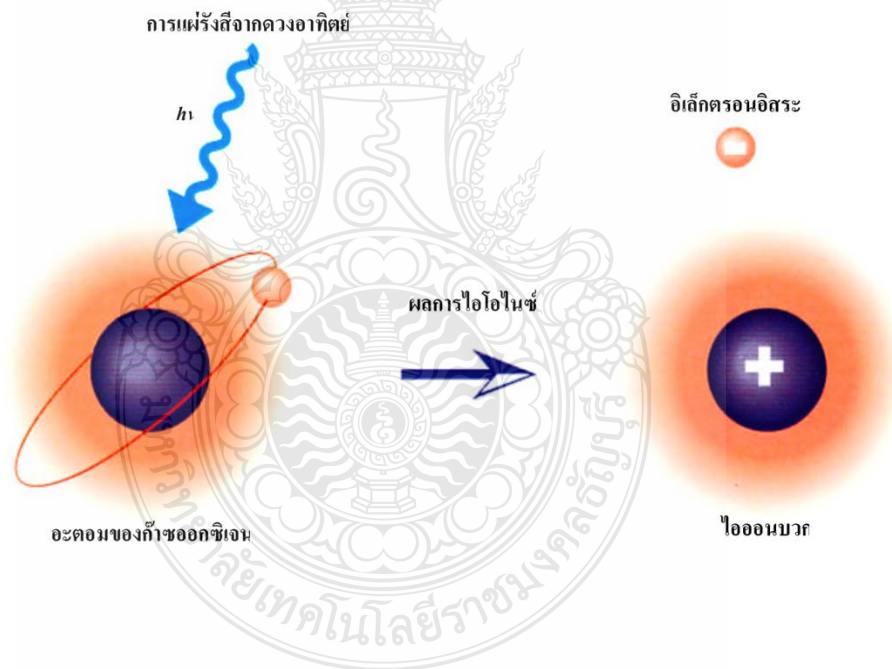
ที่ระดับความสูงเหนือกว่าตำแหน่งมีโซพอสนั้นโมเลกุลของออกซิเจนจะถูกทำให้แตกตัวด้วยรังสี UV ที่มีขนาดความยาวคลื่นสั้นกว่า  $175.9\text{ nm}$  ซึ่งขบวนการนี้มีความไวมากทำให้สถานะที่มีความแปรปรวน (Turbulence) ไม่สามารถรักษา O หรือให้ออกซิเจนอะตอม (O) รวมตัวกันได้ ดังนั้นจำนวนความหนาแน่นของออกซิเจนอะตอมจะเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 150 กิโลเมตร ดังนั้นที่ความสูงเหนือ 150 กิโลเมตรขึ้นไปชั้นบรรยากาศส่วนนี้จึงมีอะตอมของออกซิเจนเป็นส่วนประกอบหลักจึงถูกเรียกว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

## 2.3 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

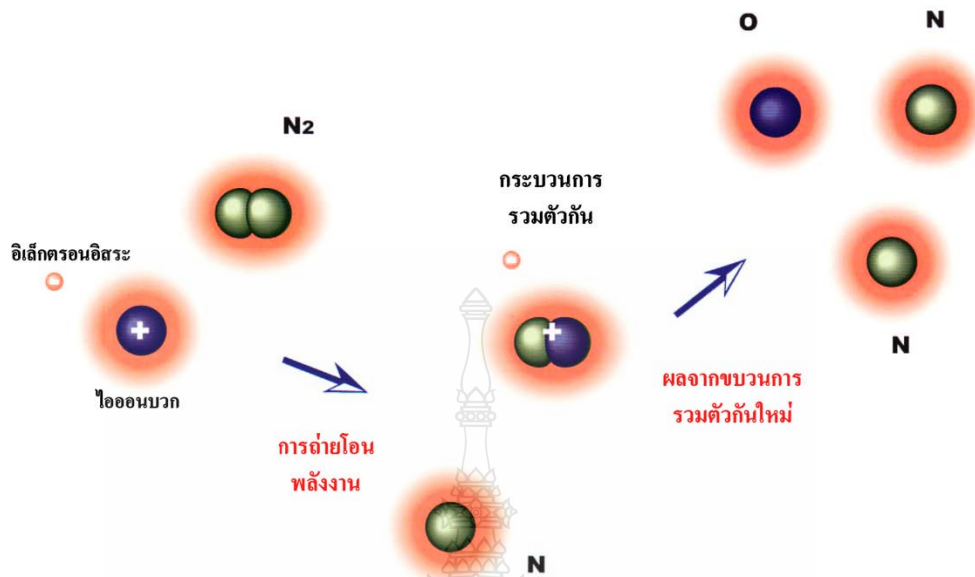
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยกลุ่มพลาสมา (Plasma) ที่เกิดการไอออไนซ์รวมตัวกันจนมีความหนาแน่นพอที่จะสะท้อนคลื่นวิทยุในความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน HF มีขอบเขตประมาณ 50 กิโลเมตร ถึง 2,000 กิโลเมตร เหนือพื้นโลกมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นอยู่ที่  $10^{10}$ - $10^{12}$ อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตรโดยมีโมเลกุลเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่ถูกไอออไนซ์และพบว่ายังคงมีโมเลกุลที่เป็นกลางจำนวนมากเหลืออยู่ในชั้นที่อยู่สูงกว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์คือ ชั้นพลาสมาสเฟียร์



(Plasmasphere) หรือโปรโตโนสเฟียร์ (Protonosphere) ซึ่งยังคงมีปริมาณอิเล็กตรอนอิสระอยู่อย่างชัดเจนซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้ คือ สunamiแม่เหล็กของโลกที่ทำหน้าที่ต่อต้านลมสุริยะ (Solar wind) นั้นเอง ส่วนขบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) เกิดจากการที่อะตอมของก๊าซออกซิเจน (Atomic oxygen) ทำปฏิกิริยากับแสงอาทิตย์ (Solar EUV Flux) แล้วเกิดการแยกตัวระหว่างไอออนบวก (Positive ion) กับอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) ซึ่งเรา เรียกปฏิกิริยาที่ว่า การไอออไนซ์จากแสงอาทิตย์ (Photo ionization) โดยการไอออไนซ์นี้จะเกิดไม่เท่ากันแล้วแต่ช่วงเวลาและระดับความสูงอีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสภาวะที่อำนวยความสะดวกต่อการเกิดขบวนการไอออไนซ์ เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ปริมาณการชนกันของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว การแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีคอสมิก (Cosmic) โดยเมื่อรังสีแพร่เข้าถึงชั้นบรรยากาศจะทำให้จำนวนอนุภาคบางส่วนของอากาศนั้นกลายเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์รูปที่ 2.2 แสดงขบวนการไอออไนเซชัน



รูปที่ 2.2 ขบวนการไอออไนเซชัน [6]



รูปที่ 2.3 ขบวนการรวมตัวกันใหม่ [6]

จากรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายได้ว่าโมเลกุลของออกซิเจนอะตอม (O) ที่เป็นส่วนประกอบหลัก จะถูกไอออไนซ์โดยโฟตอน ( $h\nu$ ) จากการแผ่รังสีดวงอาทิตย์สามารถแสดงได้ดังสมการ



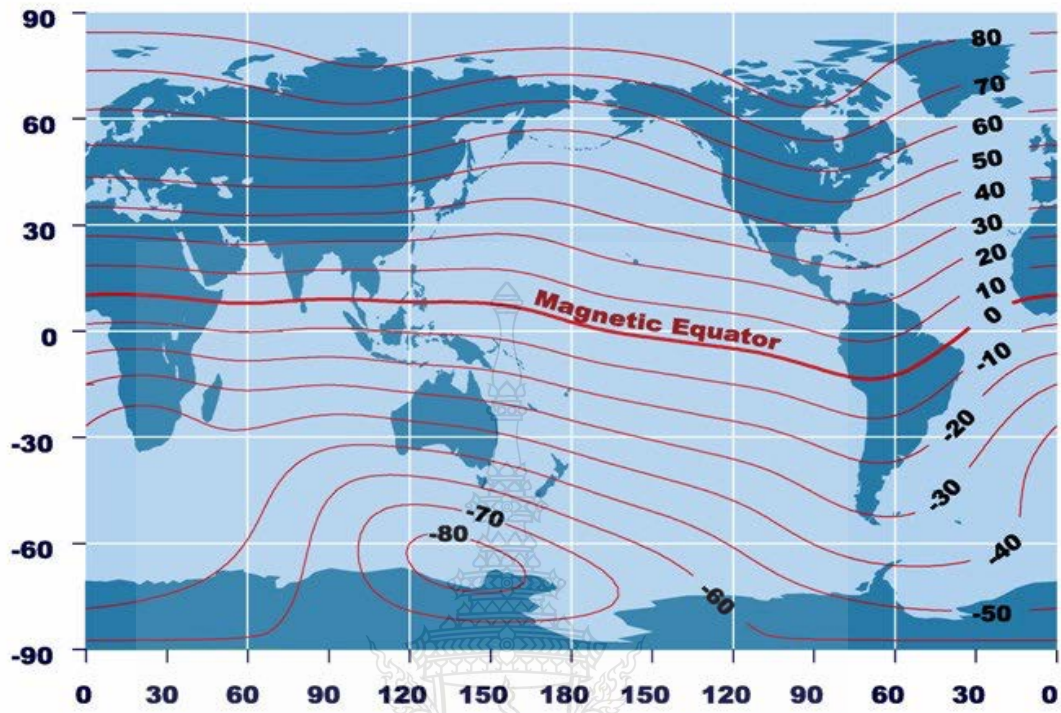
โดยผลผลิตที่ได้คือ อิเล็กตรอนอิสระ และโมเลกุลซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนหนึ่งตัวหลุดออกไปทำให้กลายเป็นไอออนประจุบวก (โมเลกุลที่ได้รับอิเล็กตรอนไปก็จะกลายเป็นไอออน ประจุลบ) ไอออนเหล่านี้เปลี่ยนแปลงได้ง่ายภายใต้แรงทางไฟฟ้า เช่น แรงดูด หรือแรงผลัก โดยปกติแล้วอิเล็กตรอน และอะตอมต่าง ๆ ของก๊าซจะเคลื่อนที่ไปมาตลอดจึงมีการชนเกิดขึ้น ดังนั้น จึงมีขบวนการการรวมตัวกันใหม่ (Process of recombination) เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.3

จากรูปที่ 2.3 อธิบายได้ว่าไอออนที่เกิดจากการบวการไอออไนซ์ชนกับโมเลกุลที่เป็นกลาง ( $N_2$ ) จะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนพลังงาน หรือการแลกเปลี่ยนประจุและรวมตัวใหม่กับอิเล็กตรอนแตกตัวได้เป็นโมเลกุลที่เป็นกลาง ดังนี้

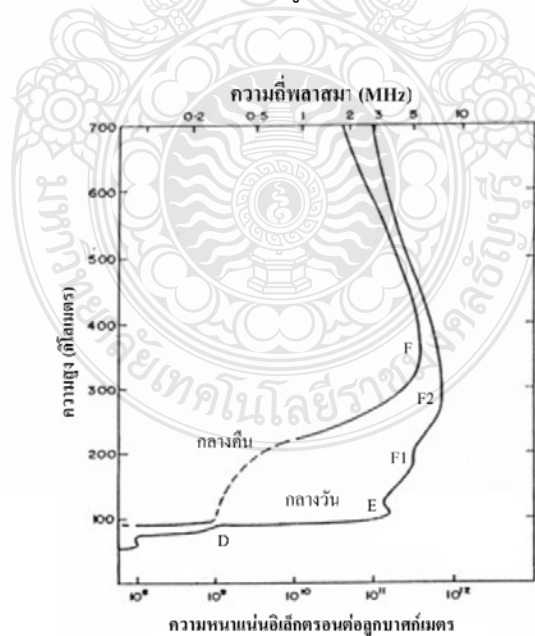


ดังนั้นโมเลกุลหนึ่งโมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์จะไม่คงความเป็นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ตลอดไป โดยในส่วนของชั้นบรรยากาศโลกที่ต่าง (ความกดดันสูง) จะมีการชนกันของอนุภาค มากจึงมีโอกาสเกิด ขบวนการรวมตัวกันใหม่มาก ดังนั้นโมเลกุลของอากาศจะคงความเป็นอนุภาค ที่ถูกไอออไนซ์ในระยะเวลา สั้นกว่าชั้นบรรยากาศส่วนบน นอกจากนี้แล้วรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากดวงอาทิตย์ได้ถูกดูดไปเป็นจำนวนมาก แล้วโดยชั้นบรรยากาศส่วนบน ดังนั้นในบริเวณที่ ความสูงต่ำกว่า 50 กิโลเมตร จะมีการไอออไนซ์เกิดขึ้น น้อยมาก ในทางกลับกันที่ความสูง มากกว่า 400 กิโลเมตรนั้นมีอนุภาคของอากาศที่เบาบาง ทำให้ความหนาแน่นของการไอออไนซ์ คำนึงถึงแม้ว่าจะได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์มากก็ตาม ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ชั้นบรรยากาศใน ระดับความสูงในช่วง 50-400 กิโลเมตร ซึ่งก็คือระดับการวางตัวของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์ นั้นจะมีปริมาณอนุภาคของอากาศ สภาวะความกดดันอากาศ และการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต ของดวงอาทิตย์เป็นไปอย่างเหมาะสมเอื้ออำนวยให้เกิดการไอออไนซ์ขึ้น ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ณ ความสูง ในช่วงนี้มีความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนสูงสุด

การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์จะไปทำการไอโอไนซ์อนุภาคในชั้นบรรยากาศ งดความรุนแรงของการไอออไนซ์ เป็นฟังก์ชันผกผันกับระยะจากดวงอาทิตย์ไปยังชั้นบรรยากาศโลกหรือพูด อีกนัยหนึ่งคือเป็นฟังก์ชันกับมุมซินิก (Zenith angle) ของดวงอาทิตย์กับโลก ซึ่งอธิบายได้ว่าเมื่อมุมซินิก น้อยลงระยะทางจากดวงอาทิตย์ก็จะเข้าใกล้โลกมากขึ้นและทำให้การไอออไนซ์เกิดรุนแรงยิ่งขึ้นด้วย ดังนั้นอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์มากที่สุดจะอยู่รอบ ๆ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กของโลกรวมถึงบริเวณละติจูดด้วย แต่เนื่องจากแกนแม่เหล็กของโลกขีฟท์ไปจากแกนหมุนของโลกเป็นมุมประมาณ 120 องศา จึงทำให้เส้น ศูนย์สูตรแม่เหล็กจะไม่ตรงกันกับเส้นศูนย์สูตร ทางภูมิศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เส้นรุ้งแม่เหล็กบนแผนที่ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ [7]



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ [8]

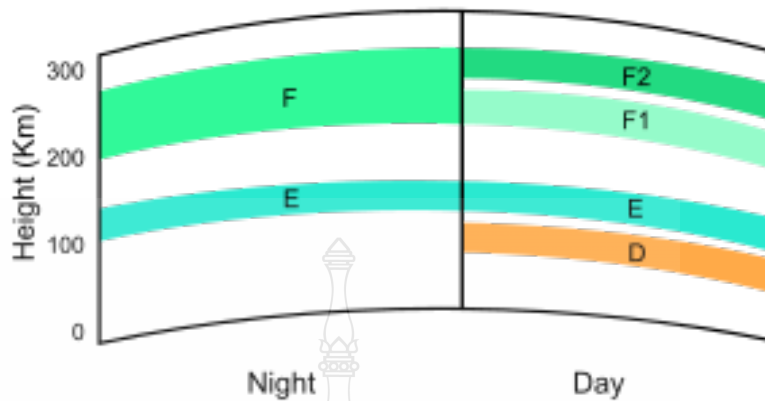
ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งเป็นชั้นย่อยหลักๆ ได้ 3 ชั้น คือชั้น D, E และ F ตามระดับความสูง และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยเริ่มจาก ชั้น D ซึ่งเป็นชั้นที่มีความสูงจากพื้นโลกต่ำที่สุด มีขอบเขตอยู่ระหว่าง 50 ถึง 90 กิโลเมตร ซึ่งจะ ปรากฏให้เห็นได้ เฉพาะเวลากลางวัน และหายไปในเวลากลางคืน เนื่องจากการรวมตัวกันใหม่ ของอนุภาคมีค่าสูงสุด โดยมี ค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์จะมีค่าสูงสุดในช่วงเวลากลางวัน และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนอยู่ในช่วงจาก  $10^8$  และ  $10^{10}$  อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตรเป็นชั้นที่มีบทบาทต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ คือ จะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นที่ความถี่ MF MF, HF และ VHF และมันยังสะท้อนสัญญาณในช่วงความถี่ LF และ VLF เนื่องจากความหนาแน่น มีไม่เพียงพอ (ประมาณ  $10^9$   $eV/m^3$ ) และมีความถี่ในการชนกันของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนในชั้นนี้มีไม่เพียงพอ และอนุภาคที่เป็นกลางที่อัตราที่สูง (ประมาณ  $10^6$  ครั้งต่อนาติ) จึงไม่สามารถส่งผลกระทบต่อคลื่นวิทยุให้เลี้ยวเบนได้ ดังนั้นจึงมีผลกระทบแค่การลดทอนของคลื่นสัญญาณ เมื่อเดินทางผ่านชั้นนี้ และเนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนนี้ทำให้ไม่สามารถศึกษาได้ด้วยวิธี ไอโอโนซอนด์แต่ใช้เทคนิคอื่นได้ เช่น การกระจัดกระจายไม่รวมใน (Incoherent scatter) การวัดโดยใช้จรวด Wave interaction และอื่น ๆ

ชั้นถัดมาคือชั้น E วางตัวอยู่เหนือชั้น D ที่ความสูง 90 ถึง 140 กิโลเมตร มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมากที่สุดที่ระดับความสูง 110 กิโลเมตร พบเห็นในเวลากลางวันเนื่องจากมีการไอออนค่อนข้างมากส่วนในเวลากลางคืนมีการไอโอไนซ์ที่น้อยมาก โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นนี้อยู่ในช่วงประมาณ  $10^5$  ถึง  $4.5 \times 10^5$   $eV/m^3$  ในช่วงเวลากลางวัน และมีค่าประมาณ  $5 \times 10^5$   $eV/m^3$  ในช่วงเวลากลางคืน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นตามการ เพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ซึ่งชั้น E นี้จะมีผลเพียงเล็กน้อยกับการสะท้อนของคลื่น HF ในเวลากลางวัน บางครั้งมีปรากฏการณ์การไอออไนซ์ที่ผิดปกติในชั้น E เรียกว่า Sporadic-E แทนด้วยสัญลักษณ์ Es โดยเกิดจากการแทรกสอดอย่างรุนแรงของคลื่นย่าน VHF และเป็นการ เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้น โดยปกติจะมีรูปแบบคล้ายก้อนเมฆมีลักษณะเป็นหย่อมๆ และจะเปลี่ยนแปลงขนาดตั้งแต่ 1 กิโลเมตร จนถึงหลาย ๆ ร้อยกิโลเมตร การเกิดขึ้นและความเข้มของการไอออไนซ์จะไม่มีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยการเกิดขึ้นนี้ไม่สามารถทำนายได้ และยังสามารถพบได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน หรือในฤดูใด ๆ ก็ได้ชั้น Es E เป็นชั้นที่บางมากแต่มีความหนาแน่นของการไอออไนซ์สูง (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าเกือบ 10 เท่า ของชั้น E ปกติ) และจะปรากฏที่ใดก็ได้ในระยะเวลาสูงตั้งแต่ 90-120 กิโลเมตร ซึ่งชั้น Es นี้มีความสำคัญในการสะท้อนคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่ต่ำกว่า 100 เมกะเฮิรตซ์

ชั้นต่อมาคือชั้น F ซึ่งเป็นชั้นย่อยบนสุดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีการไอออไนซ์มากที่สุด และเป็นเพียงชั้นเดียวที่รักษาการไอออไนซ์โดยไม่ขึ้นกับวันหรือฤดูกาลใด ๆ ชั้น F เป็น ชั้นที่อำนวยความสะดวกการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะทางไกลได้แม้ในยามกลางคืน การปรากฏชั้นนี้ได้ ของชั้น F ในเวลากลางคืนเนื่องมาจากว่าชั้น F เป็นชั้นบนสุดที่มีการไอออไนซ์สูงมาก ดังนั้นจึงมีอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์แล้ว เหลืออยู่แม้ไม่ได้รับแสงจากดวงอาทิตย์แล้วก็ตามและอีกเหตุผลหนึ่งก็คือค่าความหนาแน่นในการไอออไนซ์ มีค่าสูงในขณะที่ค่าความหนาแน่นของอากาศมีไม่มากนัก ณ ความสูงระดับนี้ ดังนั้นโมเลกุลเกือบทั้งหมดในชั้นนี้จึงเป็นโมเลกุลที่ถูกไอออไนซ์โดยอนุภาคที่ถูกไอออไนซ์ในการก่อตัวขึ้นเป็นชั้นนี้คืออะตอมของออกซิเจน

ในช่วงเวลากลางวันชั้น F จะแยกออกเป็น 2 ชั้นคือชั้น F1 และ F2 โดยปรากฏการณ์นี้จะ พบตลอดปี ในบริเวณละติจูด และปรากฏเฉพาะฤดูร้อนเท่านั้นในบริเวณละติจูดสูง โดยชั้น F1 จะวางตัวอยู่ในระดับความสูงประมาณ 140 ถึง 250 กิโลเมตร โดยมีค่าระดับความสูงเฉลี่ยคือ 220 กิโลเมตร ส่วนชั้น F2 เป็นชั้นที่วางตัวอยู่บนสุดโดยมีระดับความสูงอยู่ที่ 250 ถึง 400 กิโลเมตร โดยในช่วงเวลากลางวัน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F2 นี้จะมีค่ามากที่สุดในการบรรดาชั้น ย่อยอื่น ๆ ทั้งหมดของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ส่วนในช่วงเวลากลางคืนชั้น F1 และ F2 จะ รวมตัวกันเป็นชั้น F และมีระดับความสูงประมาณ 300 กิโลเมตร โดยการเปลี่ยนแปลงความสูง และความหนาแน่นของชั้น F2 นี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น เวลา อุณหภูมิเฉลี่ยของชั้น บรรยากาศ และรอบวัฏจักรสุริยะ เป็นต้น

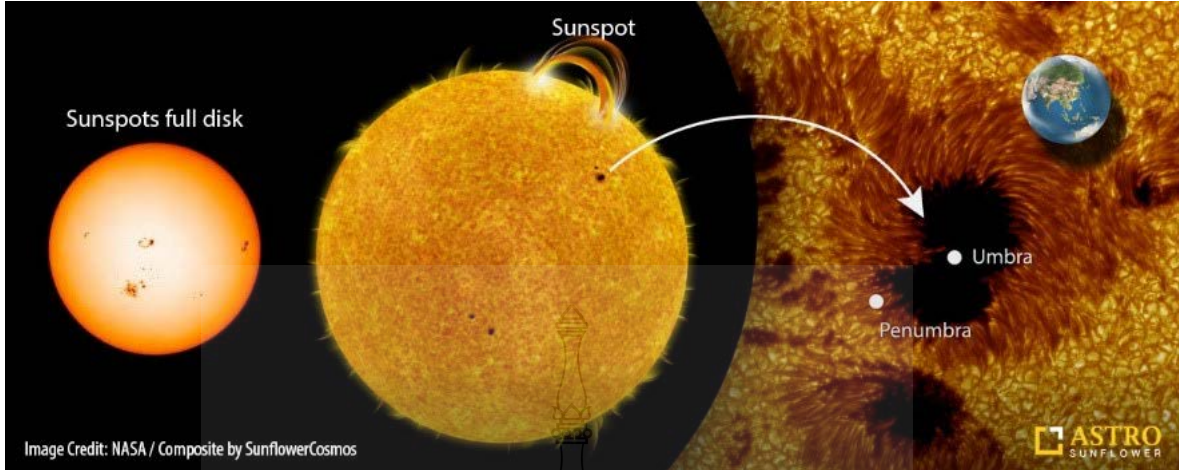
ชื่อของชั้น D, E, F1, F2 และอื่น ๆ นั้นถูกตั้งโดย Sir E. Appleton ผู้ซึ่งได้ทำงานวิจัย ทางด้านนี้ไว้เป็นอันมาก จึงเป็นที่ทราบกันว่านอกจากเรียกว่าชั้น F แล้วยังสามารถเรียกว่า “Appleton layer” ส่วนชื่อของชั้น E นั้นเรียกได้อีกชื่อคือ “Kenelly Heaviside layer” โดยชื่อ เหล่านี้ถูกตั้งขึ้นหลังจากที่พวกเขาได้เป็นผู้ค้นพบนั่นเอง



รูปที่ 2.6 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในเวลากลางวันและเวลากลางคืน [8]

## 2.4 วัฏจักรสุริยะ

วัฏจักรสุริยะก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการการเกิดไอออโนสเฟียร์ในชั้นบรรยากาศ เกิดจากจุดดับบนดวงอาทิตย์ที่หมุนรอบไปตามการหมุนของดวงอาทิตย์ ถูกกำหนดด้วยความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่า 0.4 เทสลา (4,000 G) และจุดดำนี้จะเกิดเป็นคู่ที่มีขั้วตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการไหลเวียนของสนามแม่เหล็ก บริเวณผิวของดวงอาทิตย์ โดยการเปลี่ยนแปลงนี้มีลักษณะเป็นคาบ (Solar cycle) ซึ่งจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Sunspot) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวดวงอาทิตย์ มีลักษณะเป็นจุดดำมีขนาดเล็กหรือใหญ่ขึ้นอยู่กับการรวมตัวกัน หากพิจารณาที่จุดดำจะพบว่ามีลักษณะซ้อนกัน 2 ชั้น ชั้นใน (Umbra) จะเป็นสีดำเข้ม ส่วนชั้นนอก (Penumbra) จะมีลักษณะที่จางกว่าชั้นใน บริเวณจุดดำชั้นนอกเป็นบริเวณที่มีการไหลเวียนของแก๊สจากจุดดำชั้นในไปยังบริเวณจุดดำชั้นนอก เมื่อแก๊สไหลผ่านออกจากจุดดำชั้นนอกจะเปลี่ยนทิศพุ่งขึ้นตั้งฉากกับผิวของดวงอาทิตย์ หลังจากนั้นจะย้อนพุ่งเข้ากลับจุดดำชั้นในเป็นวัฏจักรต่อไป ดังรูปที่ 2.7



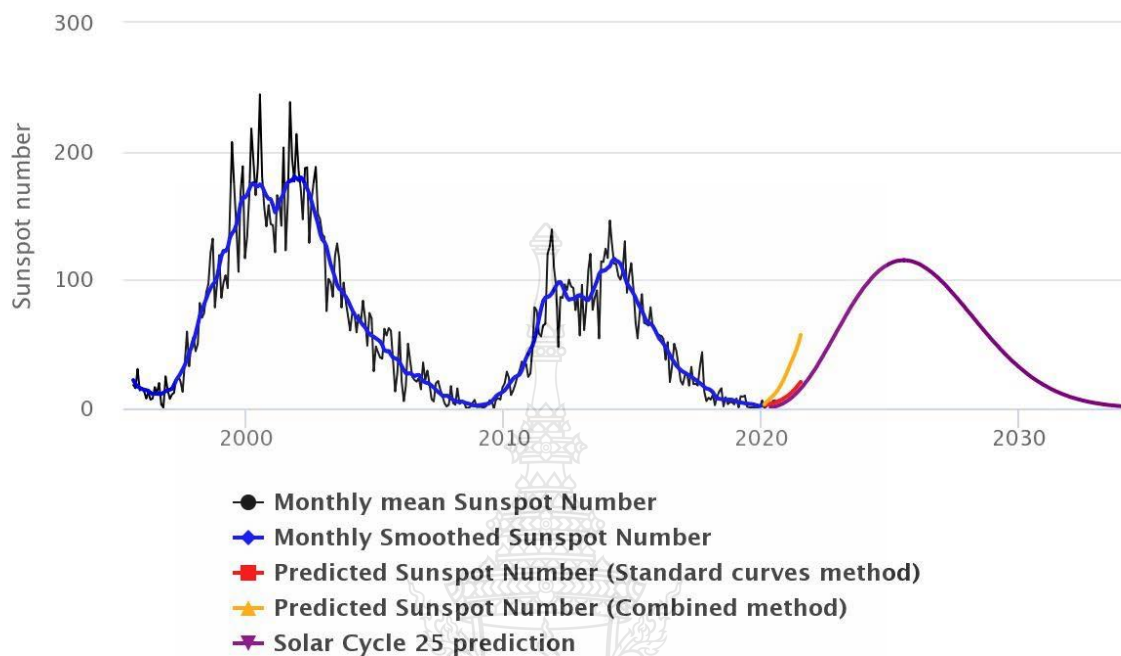
รูปที่ 2.7 จุดดับบนดวงอาทิตย์ [9]

เนื่องจากจุดดับบนดวงอาทิตย์ไม่ได้เกิดขึ้นตลอดเวลาบางช่วงเวลาอาจเกิดจุดดำขึ้นเป็นจำนวนมากแต่บางช่วงเวลาอาจไม่มีเลยแม้แต่จุดเดียวการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงที่เป็นวัฏจักรมีคาบเวลาของการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างสม่ำเสมออยู่ในช่วง 8 ปี ถึง 16 ปี มีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงประมาณ 11.1 ปี คาบการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า วัฏจักรของดวงอาทิตย์ (Solar cycle) หรือวัฏจักรของจุดดำ (Sunspot cycle) ถ้านำข้อมูลการเกิดจุดดับบนดวงอาทิตย์มาเขียนแผนภูมิแสดงความสัมพันธ์จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์กับเวลาจะได้ภาพกราฟที่ได้คล้ายกับคลื่นรูปฟันเลื่อย โดยช่วงขึ้นจะชันกว่าช่วงลงเล็กน้อย ดัง รูปที่ 2.8

จากการสำรวจดวงอาทิตย์ของนักดาราศาสตร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานนักดาราศาสตร์ยังได้พบว่า ปรากฏวัฏจักรที่ยาวประมาณ 80 ปีซ้อนอยู่บนคาบ 11.1 ปีนี้อีกด้วย นอกจากนี้วัฏจักรของจุดดับบนดวงอาทิตย์ก็ไม่ได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอมาตลอด ในปี ค.ศ. 1645 ถึง 1715 วัฏจักรของดวงอาทิตย์ได้หยุดชะงักไปนานถึง 70 ปี เป็นช่วงที่รู้จักกันในชื่อของ ช่วงต่ำสุดมอนเดอร์ (Maunder minimum) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวแทบจะไม่มีจุดดำเกิดขึ้นเลย



## Solar Cycle progression – Sunspot number



WDC–SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels

### รูปที่ 2.8 วัฏจักรสุริยะปี 1995-2020 [9]

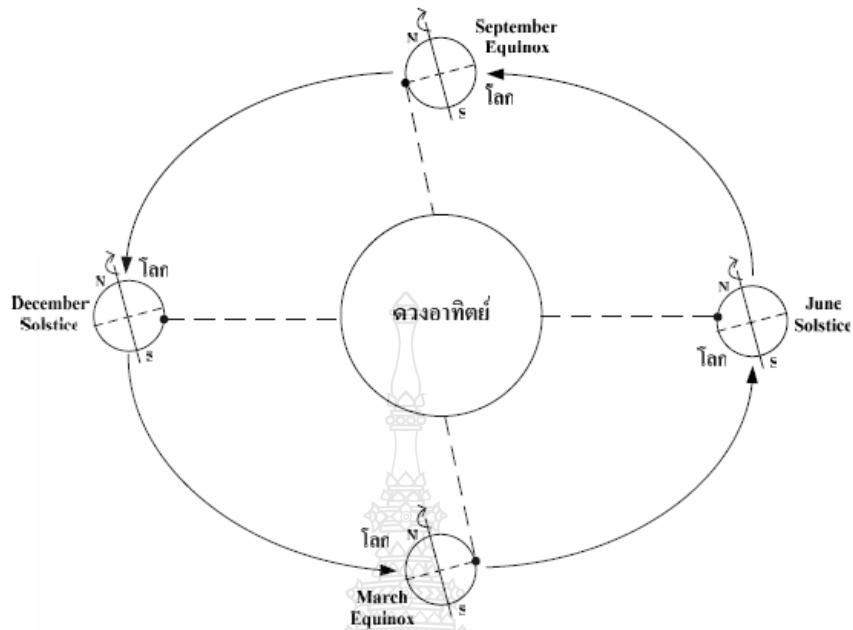
การเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ของสุริยะมีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้งสิ้น กล่าวได้ว่าความเข้ม ของแสงอาทิตย์มีผลต่อค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศและส่งผลกระทบต่อ ชั้นบรรยากาศย่อยในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ปฏิกริยาของดวงอาทิตย์จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงกับชั้น F1 และ F2

### 2.5 การแบ่งฤดูกาล

ฤดูกาลเกิดขึ้นจากการโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลก โลกจะเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ขณะเดียวกันโลกก็หมุนรอบตัวเอง โดยหมุนจากตะวันออกไปตะวันตก โดยที่แกนของโลกเอียงทำมุม 23.5° องศาตลอดเวลา การโคจรรอบดวงอาทิตย์ของโลกทำให้บริเวณต่าง ๆ ได้รับแสงสว่างและความร้อนไม่เท่ากัน ทำให้เกิดฤดูกาลสลับกันไปในเวลา 1 ปี หรือ 365 วัน เมื่อรอบโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์ครบ 1 รอบ

โลกของเราจะหมุนรอบตัวเองใช้เวลา 1 วัน ในขณะที่หมุนรอบตัวเองนั้น ก็จะหมุนรอบดวงอาทิตย์ด้วยซึ่งใช้เวลา 365 วัน ในการหมุนรอบดวงอาทิตย์ 1 รอบ แกนของโลกเรานั้นไม่ได้ตั้งตรง แต่จะเอียงทำมุมกับวงโคจรของมันเอง ด้วยเหตุนี้ในขณะที่โลกหมุนรอบดวงอาทิตย์อยู่ตามวงโคจรนั้น เมื่อโลกโคจรไปอยู่ในตำแหน่งแต่ละแห่ง ส่วนของโลกที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์จะใช้เวลาที่แตกต่างกัน และนี่ก็คือสาเหตุที่ทำให้เกิด ฤดูกาลขึ้นมา เช่น ในฤดูร้อนส่วนของโลกที่หันเข้าหาดวงอาทิตย์จะเป็นช่วงที่ยาวที่สุด (กลางวันนาน) และใน เวลากลางคืนน้อยที่สุดส่วนฤดูใบไม้ร่วงกลางวันจะยาวกลางวิญจะสั้นที่สุด ในเขตอบอุ่นและเขตกึ่งหนาว แบ่งออกเป็น 4 ฤดู ได้แก่

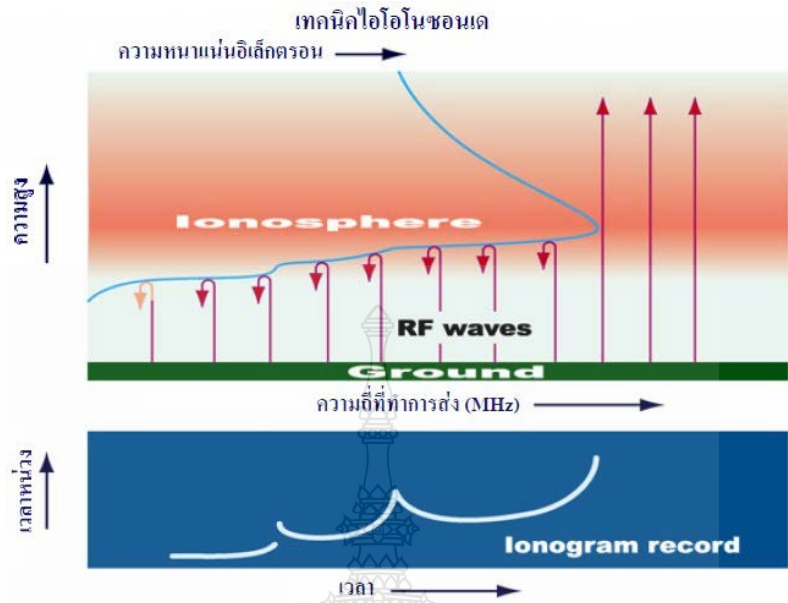
1. March Equinox (มีนาคม เมษายน) หรือ วสันตวิษุวัต (อีควินอกซ์ ฤดูใบไม้ผลิ) ประมาณวันที่ 20-21 มีนาคม ดวงอาทิตย์ขึ้นทางทิศตะวันออก และตกทางทิศตะวันตกพอดี ทำให้กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน พออย่างเช้าฤดูหนาวดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปอยู่ในซีกฟ้าเหนือมากขึ้นได้แต่ละวัน
2. June Solstice (พฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม) หรือครีษมายัน (โซลสทิส ฤดูร้อน) ประมาณวันที่ 20-21 มิถุนายน ดวงอาทิตย์อยู่ก่อนไปทางทิศเหนือมากที่สุด ดวงอาทิตย์ขึ้นเร็วและ ตกช้าทำให้ซีกโลกเหนือกลางวันยาวนานกว่ากลางคืน หลังจากนั้นดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ไปทางเส้นศูนย์สูตรฟ้า
3. September Equinox (กันยายน ตุลาคม) หรือศารทวิษุวัต (อีควินอกซ์ ฤดูใบไม้ร่วง) ประมาณวันที่ 22-23 กันยายน ดวงอาทิตย์จะขึ้นทางทิศตะวันออกและตกทางทิศตะวันตกพอดีอีกครั้ง กลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน พออย่างเช้าฤดูหนาวดวงอาทิตย์จะ เคลื่อนที่ไปอยู่ในซีกฟ้าใต้มากขึ้นในแต่ละวัน
4. December Solstice (พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์) หรือ เหมายัน (โซลสทิส ฤดูหนาว) ประมาณวันที่ 20-21 ธันวาคม ดวงอาทิตย์อยู่ก่อนไปทางทิศใต้มากที่สุดดวงอาทิตย์ขึ้นช้าและตกเร็วทำให้ซีกโลกเหนือกลางวันยาวนานกว่ากลางวัน



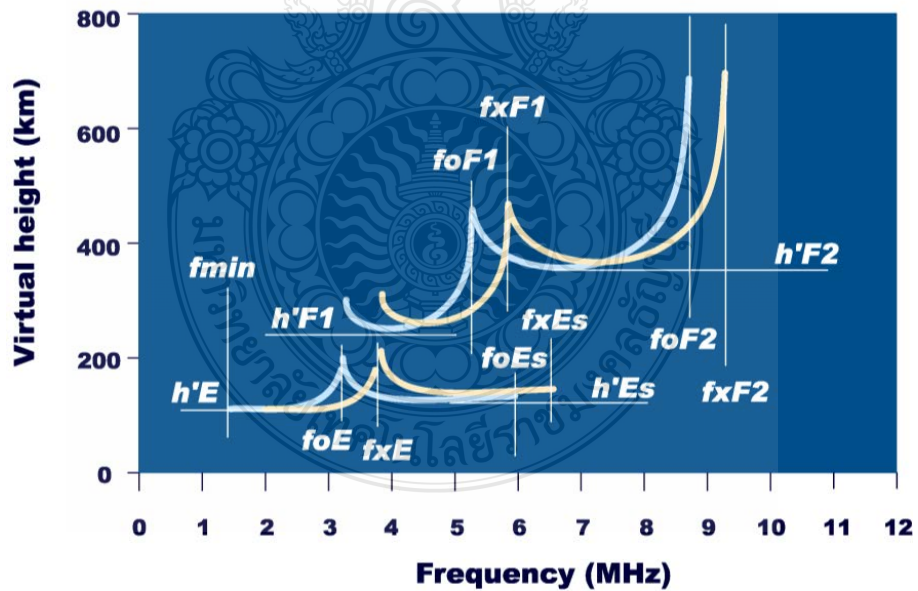
รูปที่ 2.9 แบ่งฤดูกาลโดยยึดตำแหน่งดวงอาทิตย์ [10]

## 2.6 เทคนิคไอโอโนซอนด์ (Ionosonde)

เทคนิคไอโอโนซอนด์ หรือ Ionospheric sounder เป็นเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ถูกใช้อย่างกว้างขวางโดยมีหลักการคล้ายกับเรดาร์คือ การคำนวณระยะของตำแหน่งวัตถุจากการสะท้อนของคลื่นที่ส่งออกไป โดยเทคนิคไอโอโนซอนด์จะใช้อ่านความถี่ HF (High Frequency) สามารถรับคลื่นสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มายังสายอากาศรับได้ในช่วงความถี่ 2-30 เมกะเฮิรตซ์ โดยการส่งและรับคลื่นจะเกิดอย่างต่อเนื่อง การมอดูเลชันจะใช้เทคนิคการมอดูเลชันคลื่นอย่างต่อเนื่อง โดยเพื่อความถี่แบบเชิงเส้นตามเวลาคลื่นที่ส่งขึ้นไปจะไปสะท้อนกับอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กลับลงมายังสายอากาศรับดังรูปที่ 2.10 และส่งวางกันเป็นรูปกากบาทกันเป็นโดม หลังจากนั้นจะคำนวณเวลาหน่วงในการเดินทางของคลื่น และทำการพล็อตภาพเป็นไอโอโนแกรม



รูปที่ 2.10 ภาพจำลองการส่งคลื่นไปสะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของเทคนิคไอโอโนซอนด์ [11]

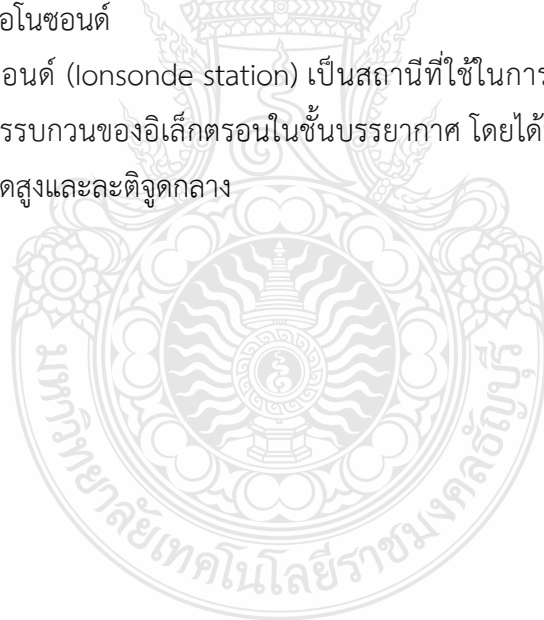


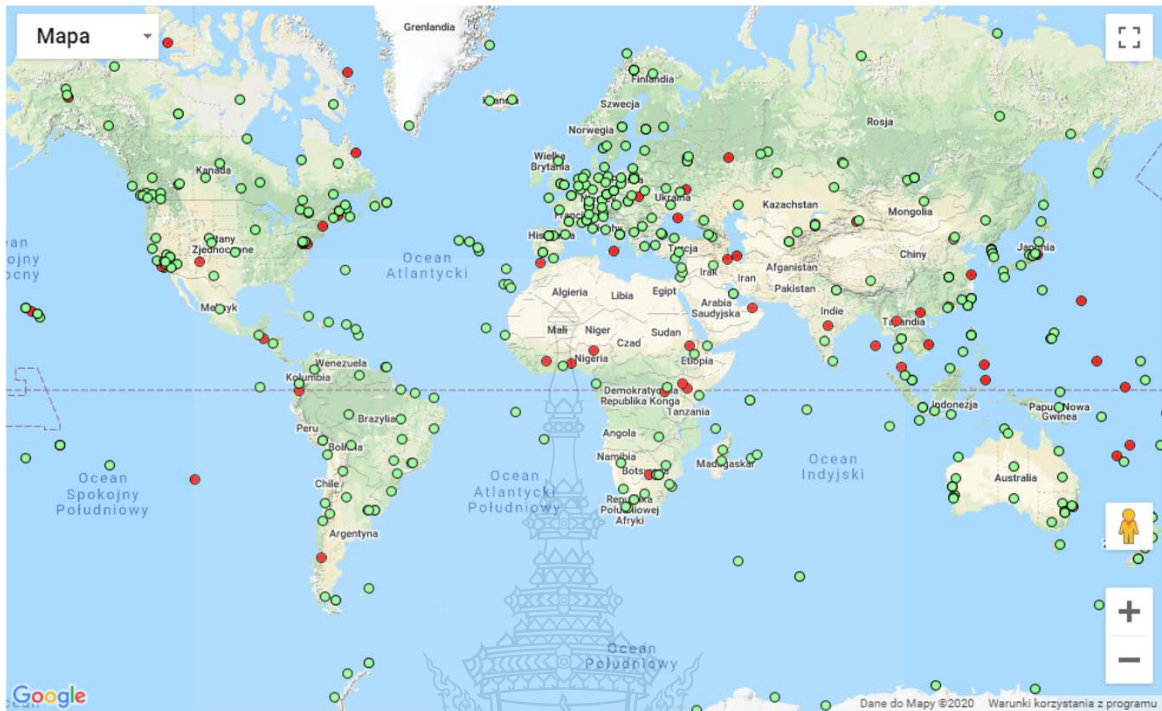
รูปที่ 2.11 พารามิเตอร์ที่อ่านได้จากไอโอโนแกรม [11]

ไอโอโนแกรม (Ionogram) คือรูปที่ใช้แสดงการสะท้อนกลับของคลื่นที่ส่งไปยังชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเทคนิคไอโอโนซอนด์ ไอโอโนแกรมสามารถแบ่งวิธีการวัดได้ 2 วิธีคือ วิธีที่ทำการวัดจากข้างล่างขึ้นข้างบน (Bottomside) และวิธีการวัดจากข้างบนลงข้างล่าง (Topside) ซึ่งวิธีส่วนมากที่ใช้กันเป็น Bottomside คือจะส่งคลื่นความถี่ 2-30 เมกะเฮิรตซ์ ขึ้นไปสะท้อนกับชั้นบรรยากาศและคำนวณค่าหน่วงเวลา เช่นเดียวกับ Topside แต่จะเป็นยังส่งคลื่นความถี่จากดาวเทียมแทน ซึ่งไอโอโนแกรมใช้ในการบ่งบอกโครงสร้างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเราสามารถอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้จากไอโอโนแกรมแสดงระดับความสูง ( $h'$ ) ความถี่วิกฤต ( $f_o$ ) และความถี่พิเศษ ( $f_x$ ) ของชั้น E, F1 และ F2 [2] พารามิเตอร์จำนวนมากที่ได้รับจากไอโอโนแกรมถูกใช้อย่างกว้างขวางเพื่อตรวจสอบแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ เช่น ความถี่วิกฤตของชั้น E ( $f_oE$ ) และความถี่วิกฤตระดับ F2 ( $f_oF2$ ) ปัจจัยการแพร่กระจายที่ระยะทาง 3,000 กม. ( $M(3000)F2$ ), จุดสูงสุดของชั้น F2 ( $hmF2$ ) เป็นต้น

#### 2.6.1 สถานีไอโอโนซอนด์

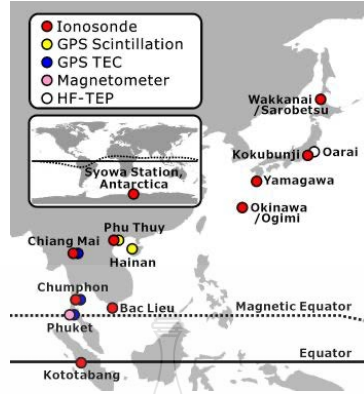
สถานีไอโอโนซอนด์ (Ionosonde station) เป็นสถานีที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บค่าของพารามิเตอร์และศึกษาการรบกวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ โดยได้มีการติดตั้งสถานีไว้ทั่วโลกส่วนใหญ่จะอยู่ในบริเวณละติจูดสูงและละติจูดกลาง





รูปที่ 2.12 บริเวณที่ตั้งสถานี Ionosonde ทั่วโลก [12]

ส่วนในพื้นที่บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้มีการติดตั้งสถานี ionosonde ทั้งหมด 6 สถานี ภายใต้โครงการ SEALION (South East Asia Low-latitude Ionospheric Network) เป็นโครงการที่ได้สนับสนุนจากสถาบันเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งชาติ (NICT) ประเทศญี่ปุ่นและได้รับความร่วมมือกับสถาบันและมหาวิทยาลัยที่เป็นมิตรในภูมิภาคอาเซียน ในปี ค.ศ 2003 เพื่อวัตถุประสงค์ในการตรวจสอบและการศึกษาการรบกวนของอิเล็กทรอนิกส์บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณเหนือและใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา หรือเรียกว่าบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) สำหรับทั่วโลกมีเพียงอเมริกาใต้ในบราซิลและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เท่านั้นที่สามารถวางอุปกรณ์เพื่อการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของไอโอสเฟียร์ในบริเวณนี้ได้



รูปที่ 2.13 สถานีไอโอโนซอนด์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [13]

ตารางที่ 2.1 สถานีไอโอโนซอนด์และตำแหน่งที่ตั้งบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [13]

Site(ID)	Lat.	Lon	Dip Lat.*	Country	Method
Chiang Mai	18.76	98.93	12.7	Thailand	Ionosonde(FMCW) GPS-TEC All-Sky Imager
Bangkok (KMI)	13.73	100.78	6.7	Thailand	GPS-TEC
Chumphon (CPN)	10.72	99.37	3.0	Thailand	Ionosonde(FMCW) GPS-TEC
Phuket (PKT)	8.09	98.32	-0.2	Thailand	Magnetometer
Phuket (PTC)	7.90	98.39	-0.4	Thailand	GPS-TEC
Kototabang (KTB)	-0.20	100.32	-10.1	Indonesia	Ionosonde(FMCW)
Phu Thuy (PHT)	21.03	105.96	15.6	Vietnam	Ionosonde(FMCW) GPS-Scintillation
Bac Lieu (BCL)	9.30	105.71	1.5	Vietnam	Ionosonde(FMCW)
Hainan (HAN)	19.53	109.13	13.7	China	GPS-Scintillation
Cebu (CEB)	10.35	123.91	3.09	Philippines	Ionosonde(FMCW)

## 2.7 แบบจำลอง IRI

The International Reference Ionosphere (IRI) คือแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและ อุณหภูมิของชั้นต่าง ๆ โดย IRI ได้รับการรับรองเป็นมาตรฐานสากลใช้กันอย่างแพร่หลายและยังใช้ในด้านการศึกษาและวิศวกรรมแบบจำลอง IRI สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามความแตกต่างของชุดคำสั่งคือ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Radio Consultative Committee (CCIR,1966) และ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Union of Radio Science(URSI,1989) แบบจำลองIRI ได้ถูกพัฒนาและปรับปรุงอย่างต่อเนื่องโดย 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 และได้พัฒนาพารามิเตอร์ตัวเลือกรูปแบบใหม่สำหรับพารามิเตอร์โพรไฟล์ด้านล่าง

การรวมกลุ่มของ COSPAR และ URSI ประกอบไปด้วยทีมผู้เชี่ยวชาญเพื่อทำการอธิบายความแตกต่างในแต่ละประเทศ ความแตกต่างในแต่ละเทคนิคที่ทำการวัดและความแตกต่างของปัญหาที่เกิดจากแบบจำลอง โดยปัจจุบันมีทะเบียนรายชื่อของคณะสมาชิกทั้งหมด 43 คณะ ดังตารางที่ 2.1 ที่แพร่กระจายทั่วโลกของการรวมกลุ่มระหว่าง COSPAR และ URSI บนแบบจำลอง IRI แบบจำลองมีการปรับปรุงแก้ไขอย่างต่อเนื่องแบบจำลอง IRI ที่ปรับปรุงข้อมูลครั้งล่าสุดคือ IRI-2016 โดยระหว่างปรับปรุงได้มีเหตุการณ์สำคัญต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.2 และยังมีการจัดประชุมเชิงวิชาการแสดงดังตารางที่ 2.2 เพื่อแลกเปลี่ยนความเห็นและปรับปรุงแบบจำลอง โดยมีสิ่งพิมพ์การประชุมเชิงปฏิบัติการลงตีพิมพ์ครั้งแรกในหนังสือ Space Research และ ต่อมาใน Advance in Space Research

### ตารางที่ 2.2 รายชื่อคณะสมาชิกทั้งหมด [27]

ประเทศ (Country)	รายชื่อสมาชิกตามประเทศ (Members by Country)
Argentina	R. Ezquer, M. Mosert de Gonzalez
Australia	B. Ward, P. Wilkinson
Austria	M. Friedrich
Brazil	M. Abdu



**ตารางที่ 2.2** รายชื่อคณะสมาชิกทั้งหมด (ต่อ)

ประเทศ (Country)	รายชื่อสมาชิกตามประเทศ (Members by Country)
Bulgaria	1. Kutiev
Canada	D. Themens
China	Jiankui Shi, W. Wan, M.-L. Zhang
Czech Republic	D. Buresova, L. Triskova, V. Truhlik
Cyprus	H. Haralambous
France	D. Alcayde, P. Coisson, R. Hanbaba
Germany	C. Stolle, W. Singer
India	P.K. Bhuyan, S.P. Gupta, KK Mahajan
Italy	B. Nava, M. Pezzopane, S. Radicella, B. Zolesi
Ivory coast	O. Obrou
Japan	K. Igarashi, K. Oyama, S. Watanabe
Nigeria	J. Adeniyi, E. Oyeyemi
Poland	A. Krankowski, H. Rothkaehl, I. Stanislawska
Russia	A Danilov, Ratovsky, V. K. Depuev, T, Gulyaeva, A Mikhailov, S. Pulinets, K.G Ratovsky, I.Zakharenkova
South africa	L-A. McKinnell, A. Poole
South korea	K. Min
Spain	D. Altadill
Taiwan	J.-Y. (Tiger) Liu, S.-Y. Su
Thailand	P. Kenpankho, P. Supnithi
ประเทศ (Country)	รายชื่อสมาชิกตามประเทศ (Members by Country)
Turkey	F. Arikan
Zambia	P. Sibanda
Uganda	J.B. Habarulema

**ตารางที่ 2.2** รายชื่อคณะสมาชิกทั้งหมด (ต่อ)

ประเทศ (Country)	รายชื่อสมาชิกตามประเทศ (Members by Country)
U.k.	L.R. Cander, M. Rycroft
Ukraine	I.Chemniak
Usa	D. Anderson, E. Araujo-Pradere, D. Bilitza, M. Codrescu, T. Fuller-Rowell, C. Mertens, B. Reinisch, L. Scherliess, J. Sojka, V. Wickwar, S-R Zhang, I. Galkin

โดยมีงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เป็นจำนวนมากเกี่ยวกับการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ทำกรวัดได้จริงกับค่าที่ทำนายได้จากแบบจำลองของ IRI แต่การศึกษาและเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยถือว่ายังมีน้อยอยู่

**ตารางที่ 2.3** เหตุการณ์สำคัญของการปรับปรุง IRI

ปี (ค.ศ.)	เหตุการณ์	รายละเอียด	สื่อกลาง
1968	COSPAR ก่อตั้ง IRI WG	โดยมี Karl Rawer ดำรงตำแหน่งประธาน	
1969	URSI เข้าร่วมกลุ่ม		
1972	ทำการสร้างตารางในขั้นต้น	ตัวแปรต่าง ๆ ของ 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

ตารางที่ 2.3 เหตุการณ์สำคัญของการปรับปรุง IRI (ต่อ)

ปี (ค.ศ.)	เหตุการณ์	รายละเอียด	สื่อกลาง
1986	IRI-86 บนแผ่นดิสก์ สำหรับใช้บน คอมพิวเตอร์ ส่วนตัว	ครอบคลุมทั่วโลกสำหรับอุณหภูมิตั้งอยู่บน AE-C, D, -E และข้อมูล AEROS-A, -B	แผ่นดิสก์เกี่ยวกับโปรแกรมทำงานของ DOS
1990	รายงานของ National Space Science Data Center (NSSDC)	แผนที่ URSI สำหรับ foF2	การกู้ข้อมูลจากเอกสาร สำคัญของ NSSDC ด้วยวิธี ftp นิรนามและใช้ประโยชน์สำหรับการเชื่อมต่อการคำนวณ ใน ส่วนของการออนไลน์ ข้อมูลของ NSSDC และ บริการข่าวสาร (NODIS)
1995	IRI-95 ออนไลน์(IRI Web)	การปรับปรุงที่ละติจูดแม่เหล็กต่าง ๆ	IRI-Web ทำการคำนวณ และพล็อตตัวแปรต่าง ๆ ของ IRI บนอินเทอร์เน็ต
1999	มติของ URSI	IRI ได้รับการยอมรับเป็นมาตรฐานสากลสำหรับชั้นไอโอโนสเฟียร์	
2001	IRI-2001 เกี่ยวกับการปรับปรุงต่าง ๆ และตัวแปรใหม่	การปรับปรุงชั้น D และ F1 รวมถึงพายุและแบบจำลองจักรวาลตัวแปรใหม่ได้แก่ F1, prob, equat,vert, iondrift	

ตารางที่ 2.4 การประชุมเชิงปฏิบัติการของ IRI และสิ่งตีพิมพ์ IRI [15]

ปี (ค.ศ.)	สถานที่จัด	หัวข้อ	สิ่งตีพิมพ์
1971 <sup>+</sup>	Seattle, USA		Space Res. XII, 1229-1335, 1972
1973	Konstanz, FRG	Measurements and Results of Lower Ionosphere	Akademie-Verlag, Berlin, 1974
1974 <sup>+</sup>	Sao Paulo, Brazil		Space Res. XV, 295-334, 1975
1980 <sup>+</sup>	Budapest, Hungary	IRI-79	WDC-A-STP,UAG-90, 1984
1982 <sup>+</sup>	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 <sup>+</sup>	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 <sup>+</sup>	Espoo, Finland	Ionosphere Informatics and Empirical Modeling	(ASR) 10(8) 1990
1989	Abingdon, UK	Development of IRI-90	(ASR) 10(11) 1990
1990 <sup>+</sup>	The Hague, Netherland	Enlarged Space and Ground data base for	(ASR) 11(10) 1991

**ตารางที่ 2.4** การประชุมเชิงปฏิบัติการของ IRI และสิ่งตีพิมพ์ IRI (ต่อ)

ปี (ค.ศ.)	สถานที่จัด	หัวข้อ	สิ่งตีพิมพ์
1992 <sup>+</sup>	Washington, DC, USA	Ionospheric Models	(ASR) 13(3) 1993
1993	Trieste, Italy	Off Median Phenomena and IRI	(ASR) 14(12) 1994
1994 <sup>+</sup>	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 <sup>+</sup>	Birmingham, UK	Descript. Of Ionospheric Storm Effects and Irregularities	(ASR) 20(9) 1997
1997	Kuhlungsborn, Germany	New Develops. In Ionospheric Modeling and Prediction	(ASR) 22(6) 1998
1998 <sup>+</sup>	Nagoya, Japan	Lower Ionosphere: Measurements and Models	(ASR) 25(1) 2000
1999	Lowell, MA, USA	IRI- Workshop 1999	(ASR) 27(1) 2001
2000 <sup>+</sup>	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 <sup>+</sup>	Houston, Texas, USA	Improved Ionosphere Specification and Forecast	ASR in press

<sup>+</sup> แสดงการประชุมของ IRI ในช่วงการรวมกลุ่มของคณะกรรมการบน Space Research

การปรับปรุงแบบจำลอง IRI อาศัยการเก็บข้อมูลตามสถานีต่าง ๆ บนโลกมาประมวลผลออกมาเป็นแบบจำลอง ซึ่งมีงานวิจัยมากมายเป็นตัวสนับสนุนในการพัฒนาแบบจำลอง พารามิเตอร์ของ hmF2

ก็เช่นเดียวกัน จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าแบบจำลอง IRI จะหาค่าพารามิเตอร์ hmF2 ได้จากสูตรสมการของ Shimasaki [14] ดังสมการต่อไปนี้

$$hmF2 = \left[ \frac{1490}{M(3000)F2} \right] - 176 \quad (2.4)$$

โดยที่ค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 (hmF2) เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงสุด สามารถคำนวณมาจากการแพร่กระจายคลื่นของคลื่นวิทยุที่สะท้อนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ M(3000)F2 จะถูกวัดแบบแมนนวลจากไอโอโนแกรมที่บันทึกโดยไอโอโนซอนด์ เพราะฉะนั้น hmF2 เป็นหนึ่งในเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการทำความเข้าใจและสร้างแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์ข้อมูล จากแบบจำลอง IRI ที่ได้ปรับปรุงขึ้นนอกจากพารามิเตอร์ hmF2 แล้ว ยังมีค่าพารามิเตอร์อื่นอีก เช่น hmD, NmD, foD, hmF1, NmF1, foF1, hmF2, M(3000)F2, NmF2, สามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้จากเว็บไซต์ [15]

โดยความสำคัญของแบบจำลองในการทำนายค่าพารามิเตอร์ hmF2 แต่ละตัวเลือกได้แก่ ตัวเลือก BSE-1979, AMTB-2013 และ ตัวเลือก SHU-2015 ซึ่งที่มาของแต่ละตัวเลือกมีความสำคัญ ดังต่อไปนี้

1. ตัวเลือก BSE-1979 [16] แบบจำลอง CCIR ขึ้นอยู่กับค่ามัธยฐานรายเดือนของ foF2, hmF2 และ M(3000)F2 ที่ได้รับจากเครือข่ายไอโอโนซอนด์ทั่วโลก (ประมาณ 150 สถานี) ในช่วงปี ค.ศ 1954 ถึง ค.ศ. 1958 รวมข้อมูลประมาณ 10,000 สถานีต่อเดือน ชุดข้อมูลแรกจะแสดงด้วยอนุกรมเวลาฟูรี-เยร์พร้อมสัมประสิทธิ์ที่ใช้กับรูปแบบพิเศษของฟังก์ชัน Legendre (ในละติจูดทางภูมิศาสตร์ ลองจิจูด และละติจูดจุ่มที่แก้ไข) แนะนำให้ใช้โมเดลนี้สำหรับพื้นที่ภาคพื้นทวีป

$$hmF2 = \left[ \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} \right] - 176, \quad (2.5)$$

โดยที่คำนวณ  $\Delta M$  คำนวณได้จาก

$$\Delta M = f1 \bullet f2 / (foF2 / foE - f3) + f4, \quad (2.6)$$

$$f1 = 0.00232 \bullet Rz12 + 0.222, \quad (2.7)$$

$$f_2 = 1 - R_{z12} / 150 \bullet \exp(-(\psi / 40)^2), \quad (2.8)$$

$$f_3 = 1.2 - 0.0116 \bullet \exp(R_{z12}/41.84), \quad (2.9)$$

$$f_4 = 0.096 \bullet (R_{z12} - 25) / 150, \quad (2.10)$$

โดยที่  $\psi$  คือละติจูดแม่เหล็ก และ  $R_{z12}$  คือค่าเฉลี่ยรายปีของจุดยอดบนดวงอาทิตย์

แบบจำลอง IRI สามารถใช้ได้ 3 วิธีการดังนี้ (1) บนเว็บแอปพลิเคชันที่ [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri_vitmo.html) (2) ซอร์สโค้ด FORTRAN ที่ <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/> (3) PC window รุ่นที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัย Mass Lowell ศูนย์วิจัยบรรยากาศ (UMLCAR) มีการใช้ IRI เวอร์ชันล่าสุด (IRI-2012) ซึ่งมีอยู่ในระบบอินเทอร์เน็ต การศึกษานี้ได้ศึกษาละติจูดทางภูมิศาสตร์ ลองจิจูดทางภูมิศาสตร์ แบบรายชั่วโมง แบบรายวัน และรายปี ถูกใช้เป็นอินพุตของแบบจำลองในการคำนวณการทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ (เช่น foF2, hmF2 และ M(3000)F2)

แม้ว่าแบบจำลอง IRI จะขึ้นอยู่กับแหล่งข้อมูลทั่วโลก ซึ่งส่วนใหญ่ได้รับการติดตั้งไว้ที่บริเวณละติจูดกลางและสูง แต่ข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะไม่ถูกนำมาใช้ในการผลิตแบบจำลอง IRI การคาดคะเนของ IRI มีความแม่นยำน้อยกว่าในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งเป็นเขตละติจูดของเส้นศูนย์สูตร ดังนั้นการทำนายที่แม่นยำของพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์จึงมีความจำเป็นอย่างมากเนื่องจากต้องใช้ความพยายามจำนวนมากในการนำเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (NN) ไปใช้เพื่อทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะค่า foF2 และ hmF2

2. ตัวเลือก AMTB-2013 [17] สำหรับรูปแบบการทดลองภายใต้สภาวะที่เสถียรของ hmF2 และ Hm เป็นที่ทราบกันดีว่าการแปรผันของคุณลักษณะไอโอโนสเฟียร์เหนือสถานีเฉพาะนั้นจำกัดอยู่ที่ละติจูดทางภูมิศาสตร์และการแปรผันเหล่านี้มีความไวต่อสนามแม่เหล็กโลก ดังนั้นเราจึงวิเคราะห์ความแปรผันของเวลาพื้นที่ที่จัดเรียงแหล่งข้อมูลของสถานีตามระบบพิกัดที่แตกต่างกัน: Geodetic, geomagnetic (กำหนดโดยการทำให้เข้าใจง่ายโดยสมมติว่าเป็นสนามขั้วสองขั้วเท่านั้น), การจุ่มแม่เหล็ก (ซึ่งนำมาพิจารณาความโน้มเอียงของแม่เหล็กที่ "แท้จริง") ปลายแม่เหล็ก (ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับเส้นสนามแม่เหล็กโลก) และละติจูดที่ปรับแก้ (โมดิปซึ่งเข้าใจถึงความลาดเอียงของสนามแม่เหล็กโลกที่ละติจูดต่ำและเข้าใจละติจูด geodetic เมื่อละติจูดเพิ่มขึ้น) รายละเอียดของระบบพิกัดต่างๆ สามารถพบได้ใน Parkinson (1983), Rawer (1963) และ Richmond (1995) IRI ในปัจจุบันใช้ละติจูด modip เพื่อจำลองลักษณะไอโอโนสเฟียร์ (เช่น Bilitza, 2001) จากผลลัพธ์ของเรา (ไม่ได้แสดงไว้ที่นี่) ระบบละติจูด modip เป็นหนึ่งใน

ตัวเลือกที่ดีที่สุดเพื่อให้พอดีกับรูปแบบการทดลองของ hmF2 และ Hm นั่นคือเหตุผลที่การวิเคราะห์ข้อมูล และผลการสร้างแบบจำลองที่นำเสนอต่อไปนี้จะอ้างอิงถึงระบบพิกัดโมดิบ

$$f(\theta, \varphi, T) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N P_n^m(\cos\theta) \{g_n^m(t) \cos(m\varphi) + h_n^m(t) \sin(m\varphi)\} \quad (2.11)$$

โดยที่  $\theta$  คือระบบพิกัดทรงกลม,  $\varphi$  คือละติจูดร่วมและเส้นแวง T หมายถึงเวลาในหน่วยใด ๆ  $P_n^m$  คือฟังก์ชันเลอว์ซ็องด์ร์  $g_n^m$  คือฮาร์โมนิกทรงกลม และ  $h_n^m$  ค่าสัมประสิทธิ์ของเกาส์ ซึ่งสามารถเป็น ฟังก์ชันของเวลา (T) เทคนิค SH ต้องมีการกระจายแหล่งข้อมูลที่ดีเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ของแบบจำลองที่ดีที่สุดไม่ใช่ ในชุดข้อมูลของเรา ซึ่งเรามีการกระจายละติจูดที่ค่อนข้างดีของสถานีเท่านั้นเราได้ใช้การประมาณที่อธิบาย ไว้ใน Altadill et al (2009) เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยสมมติว่าความแตกต่างของเวลาท้องถิ่นในลักษณะไอโอโนสเฟียร์จะเท่ากับความแตกต่างของเส้นแวงสำหรับสภาวะเวลาเสียบสงบ เราได้กำหนดสถานีสมมติ 24 สถานี โดยกระจายลองจิจูด  $15^\circ$  แยกจากกันรอบ ๆ เส้นขนานเหนือแต่ละสถานีเดิมที่วาง ตำแหน่งละติจูดทาง ภูมิศาสตร์ที่กำหนดความคล้ายคลึงกันของสถานีเดิมนั้นถูกจำกัดอยู่กับการเลือกระบบพิกัดที่เหมาะสมกับความแปรผันของขนาดไอโอโนสเฟียร์ที่กำลังศึกษาอยู่

3.ตัวเลือก SHU-2015 [18] เทคนิคการสร้างแบบจำลองเชิงประจักษ์หนึ่งคือการแยกตัวของค่า มัธยฐาน hmF2 เป็นอนุกรมฟังก์ชันมุมฉากโดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์เพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์กำลังสองน้อย ที่สุด โดยทั่วไปแล้ว ฮาร์โมนิกทรงกลมถูกใช้เป็นพื้นฐานโดย Jones and Gallet, (1962), Altadill et al. (2013), Brunini และคณะ (2013), Shubin และคณะ (2013) แต่ผู้เขียนบางคนเลือกฟังก์ชันมุมฉากเชิง ประจักษ์ (EOF) (Dvinskikh, 1988; Zhang et al., 2014) หรือพหุนาม (Gulyaeva et al., 2008) สำหรับ โมเดลนี้ ชั้นแรกเราได้สร้างการตัวของฮาร์โมนิกทรงกลมสำหรับการโดยจะพึ่งพาพื้นที่เหนือพื้นผิวโลกในซึ่ง จะเก็บค่าแต่ละชั่วโมงและในแต่ละเดือนแยกกันเป็น 2 ชุดข้อมูลได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้คือการสลายตัว แบบฟูรีเยร์เพื่ออธิบายความแปรผันของเวลา การสลายตัวทั้งสองถูกแยกจากกันสำหรับระดับกิจกรรม แสงอาทิตย์ที่ต่ำ  $F10.7A \leq 80$  และ กิจกรรมแสงอาทิตย์ที่สูง  $F10.7A \geq 120$

การสลายตัวเชิงพื้นที่ของ hmF2 ดังสมการที่ 2.12

$$h_m F2(\lambda, \mu, UT_i) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N [g_l^m(UT_i) \cdot \cos m\lambda + h_l^m(UT_i) \cdot \sin m\lambda] \cdot P_l^m(\cos\theta) \quad (2.12)$$

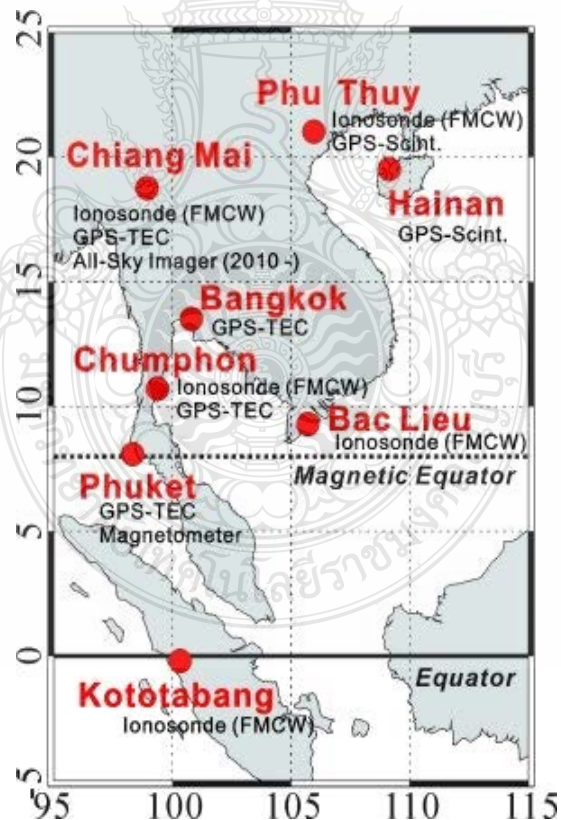


โดยที่  $\lambda$  หมายถึงเส้นแวงทางภูมิศาสตร์,  $\mu$  หมายถึงละติจูดจุ่มที่แก้ไขแล้ว,  $P_n^m(\cos\theta)$  คือฟังก์ชันเลอจองด์,  $g_i^m$  และ  $h_i^m$  ขึ้นอยู่กับชั่วโมง UT ( $UT_i, i=0,1,2,\dots$ ) เช่นเดียวกับ Shubin et al. (2013) ฮาร์โมนิก  $M = 8$  ถูกใช้สำหรับลองจิจูดและ  $L = 12$  สำหรับละติจูดที่แก้ไข



### บทที่ 3 วิธีศึกษาวิจัย

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาวิจัยการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์พารามิเตอร์ hmF2 ที่เชื่อมระหว่างจุดใกล้กับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กของเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะได้รับการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 กับ 3 สถานีไอโอโนซอนด์ถูกติดตั้งเกือบตลอดเส้นเมริเดียนแม่เหล็กที่ 100°E เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กได้แก่ สถานีชุมพร (ละติจูด 10.72°N ลองจิจูด 99.37°) และ สถานีเชียงใหม่ (ละติจูด 18.76°N ลองจิจูด 98.93°E) และโกโตตาบัง (ละติจูด 0.2°S, ลองจิจูด 100.30°E) ดังรูปที่ 3.1 การเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องส่งและรับคลื่นวิทยุย่าน HF ผ่านสายอากาศและรับคลื่นที่สะท้อนกลับมาด้วยเครื่องรับและเก็บข้อมูลเป็นภาพ



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งสถานีไอโอโนซอนด์ [13]

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลใช้เครื่องรับส่งรุ่น SKI-96092 FM/CW Radar ตัวอย่างที่สถานีชุมพร ดังรูปที่ 3.2 ทำการส่งและรับคลื่นในย่าน 2-30 เมกะเฮิร์ตซ์ ผ่านสายอากาศชนิดไดโพล 2 ชั้นวางตัดขวาง กันเป็นโคม ความสูงของเสาที่ยึดสายอากาศสูง 27 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ อาคารสูงเป็นต้นดังรูปที่ 3.3 สายอากาศชั้นที่ทำการส่งคลื่นขึ้นไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์จะวางตั้งฉากกับเสาอากาศชั้นที่ทำการรับคลื่นที่สะท้อนลงมายังโลกโดยส่งความถี่แบบต่อเนื่อง (Continuous wave) และมีการเพิ่มอัตราความถี่ที่ส่งขึ้นไปทุก ๆ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ต่อวินาที ซึ่งใน 1 รอบของการทำงานจะใช้เวลาทั้งหมด 5 นาที จากนั้นจะส่งข้อมูลเป็นภาพไอโอโนแกรมไปบันทึกที่คอมพิวเตอร์ แล้วจะทำการปรับสัญญาณภาพของเครื่องใหม่ในทุก ๆ รอบของการทำงาน โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทุก ๆ 1 ชั่วโมงและนำภาพไอโอโนแกรมที่ได้เข้าโปรแกรม Special scaling เพื่อเลือกเก็บข้อมูลของพารามิเตอร์ hmF2 กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นนำข้อมูลทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.5 ต่อไป

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการสังเกตโดยไอโอโนซอนด์ สถานีชุมพร [19]

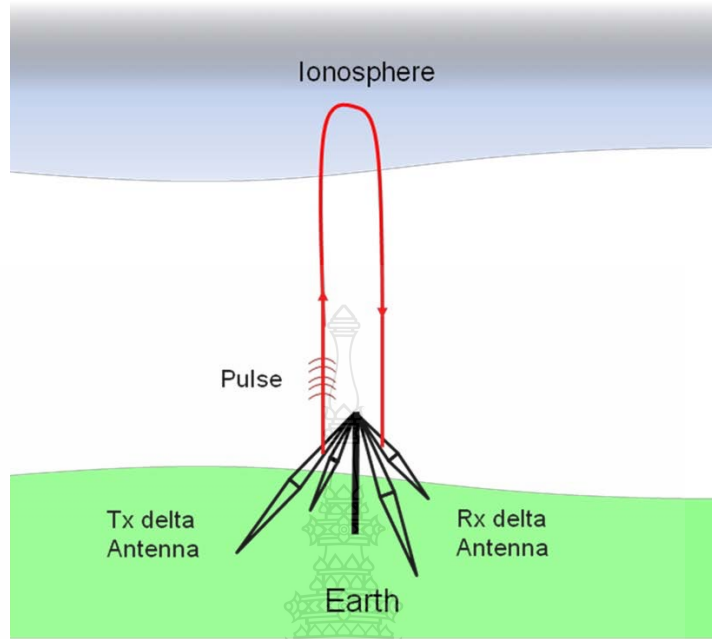
ระบบ	Frequency Modulated-Continuous Wave (FM-CW) with pseudo-random Tx/Rx switching
เครื่องรับและเครื่องส่งคลื่น	SKI-96092 FM/CW Radar
กำลังสูงสุดของเครื่องส่ง	20 วัตต์
กำลังเฉลี่ยของเครื่องส่ง	10 วัตต์
ย่านความถี่	2 ถึง 30 เมกะเฮิร์ตซ์
อัตราการเพิ่มความถี่	100 กิโลเฮิร์ตซ์ ต่อ วินาที
รอบการทำงาน	5 นาที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

โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าพารามิเตอร์  $hF$ ,  $foF2$  และ  $M(3000)F2$  สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย (1) ชุดเครื่องส่งและเครื่องรับ (2) สายอากาศ และ (3) คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม โดยสามารถแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 เครื่องส่งและเครื่องรับรุ่น SKI-96029 FM/CW Radar [19]





รูปที่ 3.3 สายอากาศชนิดโพเตดัดโดโพล [20]



รูปที่ 3.4 สายอากาศที่สถานีชุมพร ประเทศไทย [19]

### 3.1.2 สายอากาศ

เป็นสายอากาศชนิดโพลเด็ตไดโพล (Folded dipole) 2 ชั้น วางตัดขวางกันเป็นโดมโดยใช้เสาที่มีความสูง 27 เมตรเป็นตัวยึดสายอากาศ (รูปที่ 3.3) ซึ่งต้องใช้เสาที่มีความสูง 27 เมตรเพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้ เป็นต้น โดยเสานี้ยังมีความสูงมากก็จะยิ่งดีแต่เนื่องจากที่สถานีชุมพรนั้นอยู่ใกล้กับสนามบินจึงทำการติดตั้งเสาสูงเพียง 27 เมตรเท่านั้น เพื่อไม่ให้กีดขวางทางขึ้น-ลงของเครื่องบินส่วนสายอากาศชั้นที่ทำการส่งคลื่นขึ้นไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์จะวางตั้งฉากกับสายอากาศชั้นที่ทำการรับคลื่นที่สะท้อนลงมายังพื้นโลก

### 3.1.3 คอมพิวเตอร์ที่ใช้บันทึกข้อมูลภาพไอโอโนแกรม

คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูลมีจำนวน 2 เครื่อง โดยเครื่องแรกทำการติดตั้งไว้ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ซึ่งเป็นสถานที่ติดตั้งสถานีไอโอโนซอนด์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากเครื่องรับมาทำการคำนวณเวลาหน่วงของคลื่นที่สะท้อนกลับมายังเครื่องรับที่ทำการบันทึกค่าทุก ๆ 15 นาที มาทำการสร้างเป็นภาพไอโอโนแกรม โดยมีการเก็บภาพเป็นไฟล์ .PNG จากนั้นใช้คอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่งที่ติดตั้งไว้ ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการทำการดึงข้อมูลไฟล์ภาพไอโอโนแกรมที่บันทึกได้ ณ สถานีชุมพร มาเก็บไว้ในเครื่องเพื่อที่จะทำการเก็บและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม Special scaling ต่อไป โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ โปรแกรม Special scaling เพื่อทำการเก็บวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากไฟล์ภาพไอโอโนแกรมจำนวน 3 ตัว ได้แก่ hF, foF2 และ M(3000)F2 นั้นเอง

เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับบันทึกข้อมูลไฟล์ภาพไอโอโนแกรมจากทั้ง 2 สถานที่นี้ จำเป็นต้องมีพื้นที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล (Hard disk) เป็นจำนวนมาก เนื่องจากไฟล์ภาพไอโอโนแกรมที่ทำการเก็บได้จะมีขนาดใหญ่มากเมื่อทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลาหลาย ๆ ปี

### 3.1.4 สถานที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

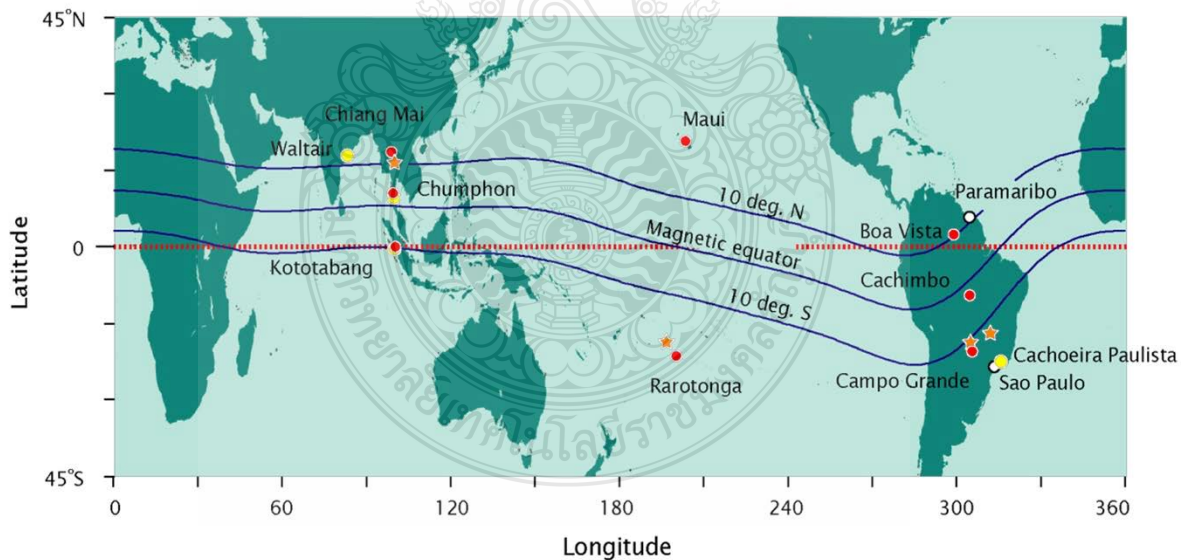
สถานที่ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลได้จัดตั้งจากองค์กร National Institute of Information and Communication Technology (NICT), ประเทศญี่ปุ่น โดยได้ติดตั้งสถานีในบริเวณต่าง ๆ ชื่อ SEALION is an ionospheric observation network in Southeast Asia วัตถุประสงค์เพื่อเก็บค่าการตรวจสอบและการศึกษาและศึกษารอบกวนของอิเล็คตรอนในชั้นบรรยากาศในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้บริเวณเส้นศูนย์สูตร ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานี มีสถานีดังต่อไปนี้

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

3.1.4.2 สถานีมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย (Chiang Mai : CMU) ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออกและตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 12.7 องศาเหนือ

3.1.4.3 สถานีสถาบันการบินและอวกาศแห่งชาติ (LAPAN) โกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย (Kototabang : KTB) ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออกและตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก -10.1 องศาเหนือ

ที่ตั้ง 3 สถานีติดตั้งในบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่เหนือและใต้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา สำหรับในโลกมีพื้นที่บริเวณประเทศบราซิล และ ประเทศไทยที่สามารถวางอุปกรณ์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศในบริเวณนี้ได้ ดังรูปที่ 3.5

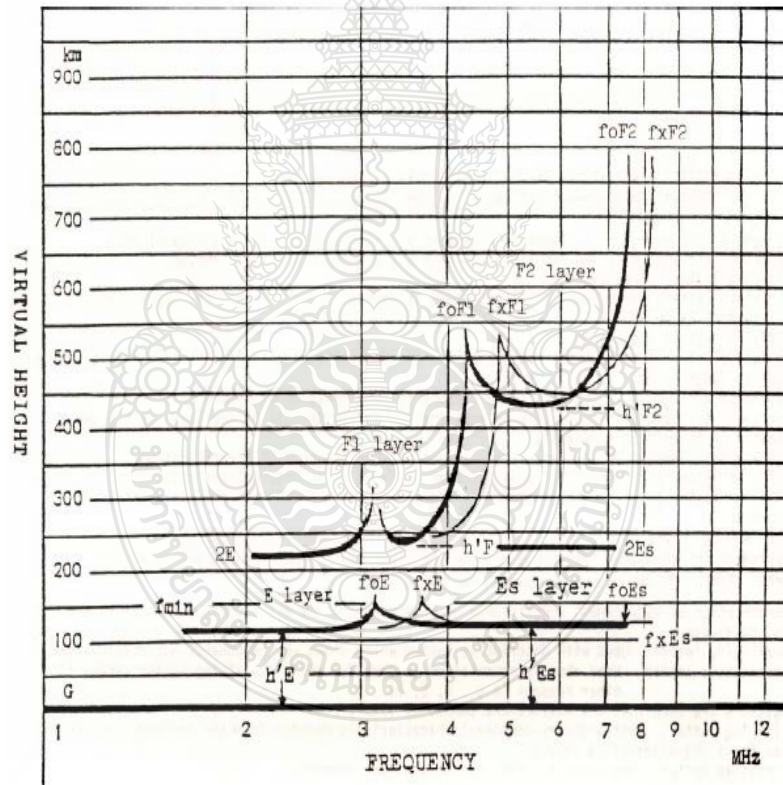


รูปที่ 3.5 แผนที่โลกที่ทำการติดตั้งบริเวณ EIA [21]

### 3.2 วิธีเก็บค่าพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ศึกษาคือ  $hmF2$  จากภาพไอโอโนแกรมทั้ง 3 สถานี ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่  $hF$ ,  $foF2$  และ  $M(3000)F2$  จากไอโอโนแกรมที่ทำการบันทึกได้ ณ สถานีชุมพร โดยการเก็บค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 3 ตัวนี้ สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรม Special scaling ในการเก็บค่า อย่างไรก็ตามในส่วนต่อไปจะนำเสนอตัวอย่าง การเก็บค่าพารามิเตอร์  $M(3000)F2$  โดยใช้คู่มือการอ่านค่าจากภาพไอโอโนแกรม [19] ก่อนส่วนการเก็บค่า โดยใช้โปรแกรม Special scaling จะทำการนำเสนอในหัวข้อที่ 3.3 ต่อไป

ภาพไอโอโนแกรมที่ได้จากเทคนิคไอโอโนซอนด์สามารถทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพจำลองพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรม [19]

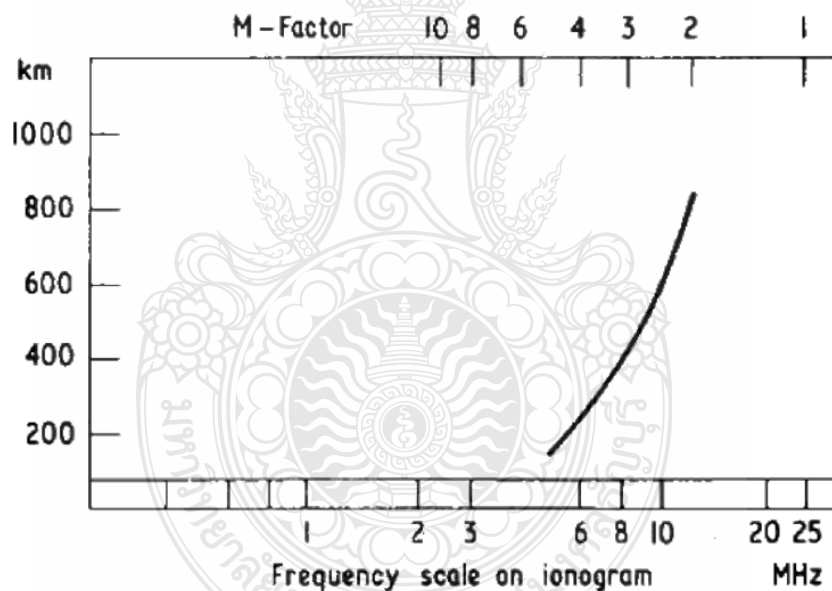


### 3.2.1 ตัวอย่างการเก็บค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2

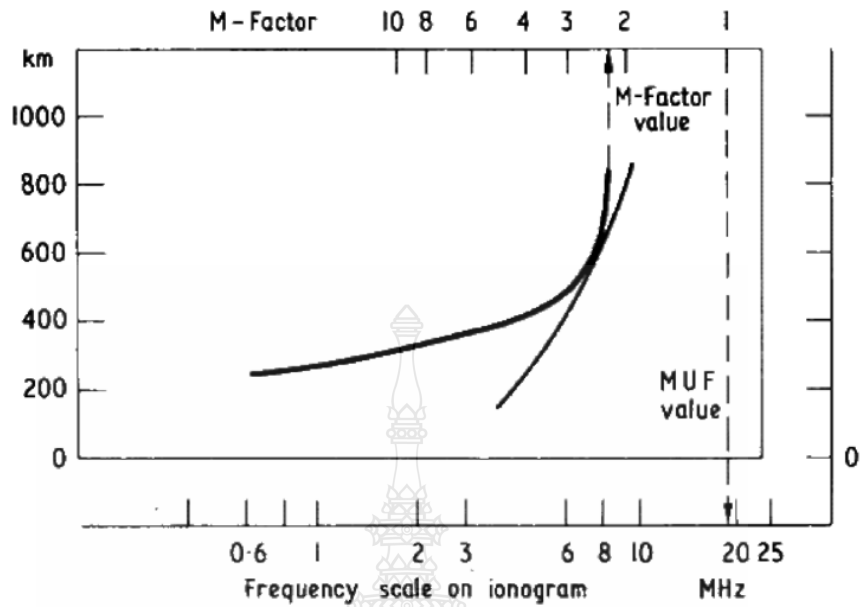
จากไอโอโนแกรม ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งานได้ที่ระยะทาง 3,000 กิโลเมตร ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หรือที่รู้จักกันในสากลจะใช้สัญลักษณ์ M(3000) F2 โดยที่ F2 ของชั้น ค่าพารามิเตอร์ MUF(3000)F2 นี้มีความเกี่ยวข้องกับค่าพารามิเตอร์ foF2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทั้ง ตัวนี้ถูกนำไปใช้ในการหาค่าแฟคเตอร์ M(3000)F2 ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

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

โดยที่ค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 สามารถวัดได้จากเส้นสัมผัสที่ทาบบกับส่วนโค้งของค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 จากภาพไอโอโนแกรมได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



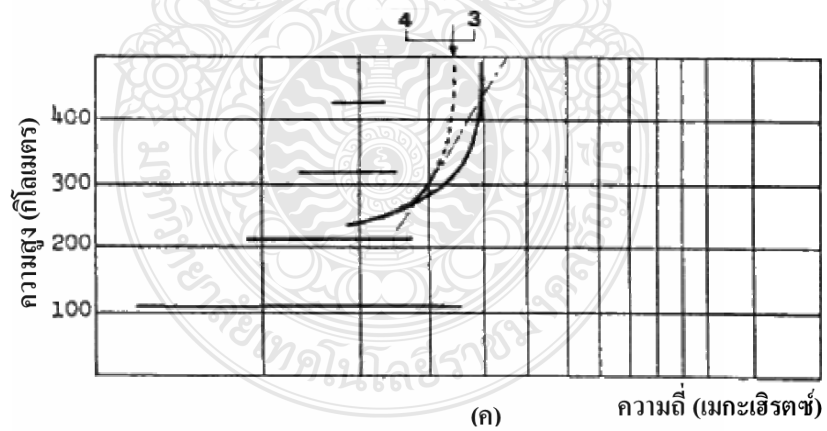
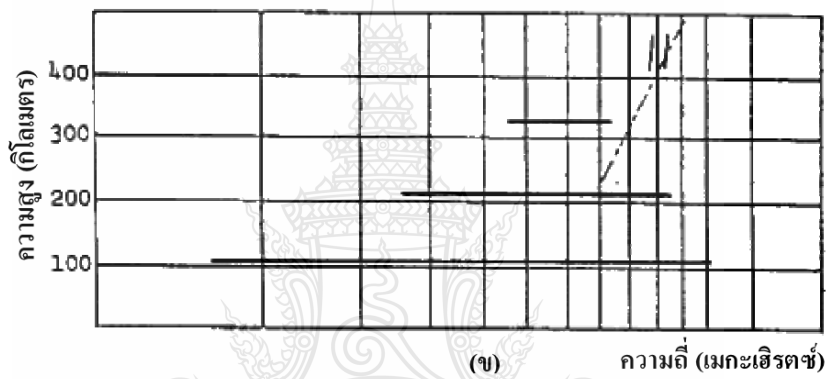
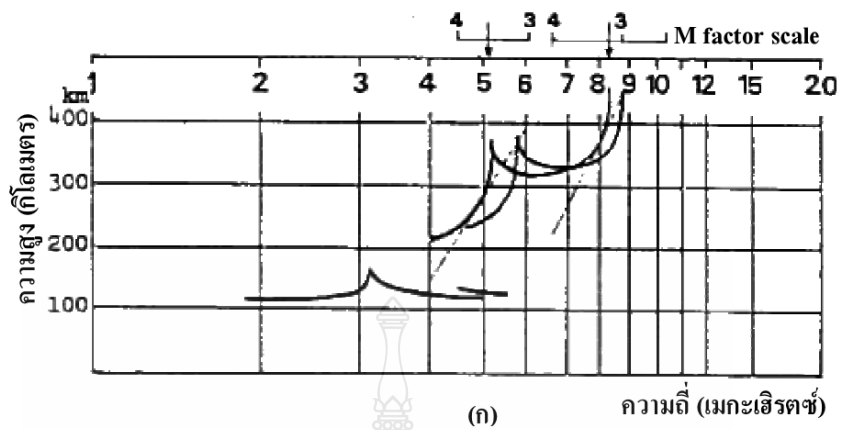
รูปที่ 3.7 ภาพจำลองของ M แฟคเตอร์สไลเดอร์ [19]



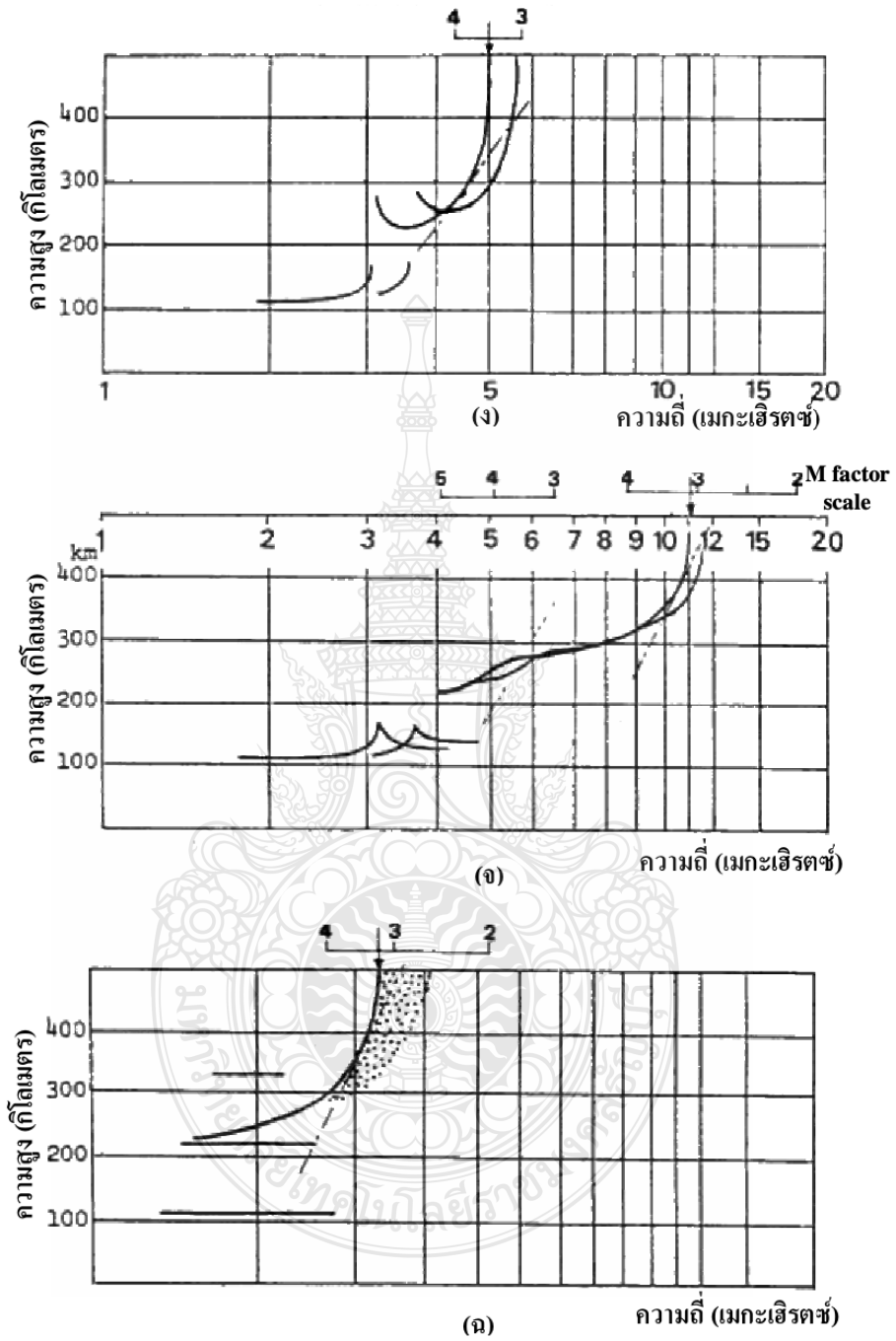
รูปที่ 3.8 ภาพจำลองการใช้งานของ M แฟคเตอร์สไลเดอร์ [19]

ตัวอย่างของการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ จากภาพไอโอโนแกรม ณ เวลาต่าง ๆ ที่สามารถพบได้บ่อยมีดังนี้

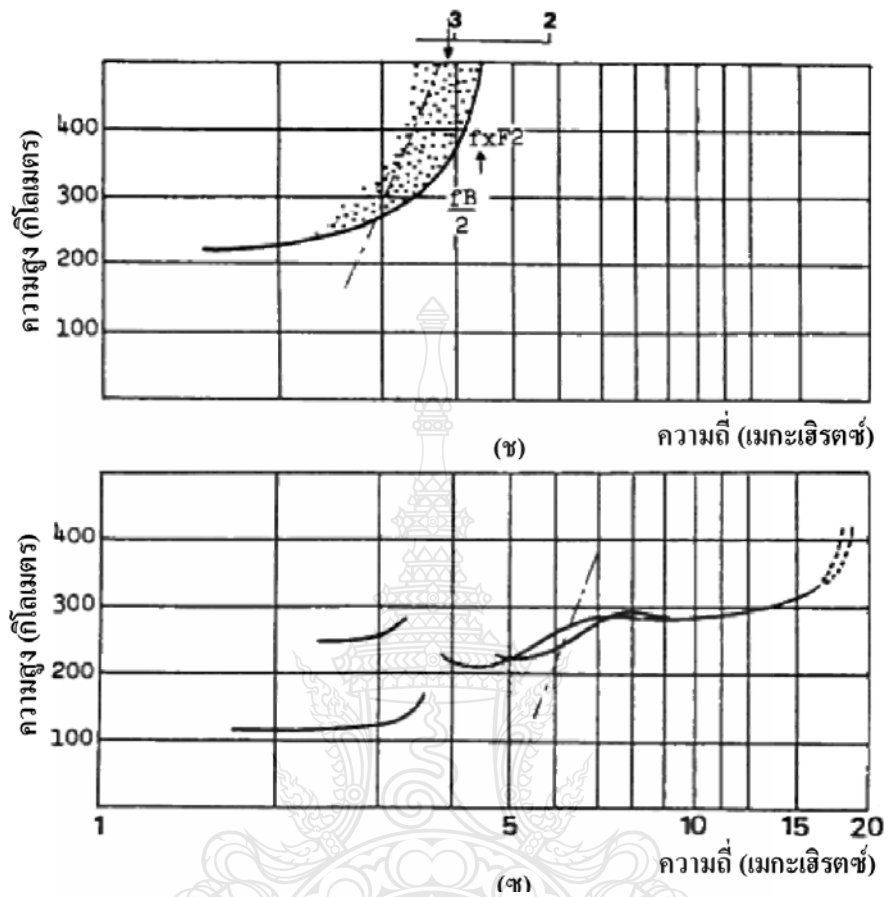




รูปที่ 3.9 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบต่าง ๆ [19]



รูปที่ 3.9 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบต่าง ๆ (ต่อ)



รูปที่ 3.9 ภาพจำลองของไอโอโนแกรมในการวัดค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แบบต่าง ๆ (ต่อ)

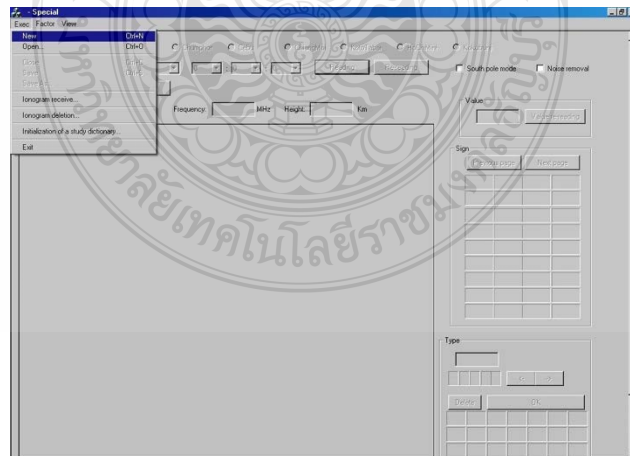
ภาพไอโอโนแกรมในรูปที่ 3.9 (ก) เป็นภาพไอโอโนแกรมที่เกิดขึ้นในเวลากลางวันของ ช่วงเดือน พฤษภาคม ถึงเดือนกรกฎาคม ทำให้เราสามารถทำการบันทึกข้อมูลของชั้น F1 และ F2 ได้อย่างชัดเจน. โดยนำเส้นสเกลไปเทียบกับส่วนโค้งของชั้น F1 และ F2 นั้นเอง รูปที่ 3.9 (ข) แสดงภาพไอโอโนแกรมที่ถูกบดบังด้วยชั้น Es ทำให้ไม่สามารถทำการเก็บวัดค่าข้อมูลได้ โดยจะใส่สัญลักษณ์ A เพื่อเป็นที่ทราบกันว่าชั้น F1 ถูกบดบังด้วยชั้น Es นั้นเอง ในรูปที่ 3.9 (ค) แสดงภาพไอโอโนแกรมที่เกิดในช่วงเวลากลางคืน โดยในชั้น F จะพบเพียงช่วงที่เป็นความถี่สามัญพิเศษ (Extraordinary) อย่างชัดเจน ส่วนความถี่สามัญ (Ordinary) จะสูญหายไป โดยค่า M(3000)F2 ในรูปที่ 3.9 (ง) แสดงภาพไอโอโนแกรมที่ไม่สามารถ บันทึกค่าจากชั้น F2 ได้ โดยจากรูปเป็นร่องรอยของชั้น F1 ส่วนชั้น F2 ในที่นี้รู้จักกันในชื่อของเงื่อนไข G (G condition)

โดยที่  $f_{oF2}$  มีค่าต่ำลง ๆ ไปจนถึงค่า  $f_{oF1}$  หรืออาจจะต่ำกว่า โดยในที่นี้จะใส่ สัญลักษณ์  $G$  เพื่อเป็นที่ทราบกัน รูปที่ 3.9 (จ) แสดงภาพไอโอโนแกรมที่สามารถทำการวัดค่าใน ชั้น  $F2$  ได้ตามปกติ แต่ส่วนโค้งในชั้น  $F1$  ไม่ค่อยชัดเจน โดยจะใส่สัญลักษณ์  $L$  เพื่อเป็นที่ทราบกัน ในรูปที่ 3.9 (ฉ) เป็นภาพ ไอโอโนแกรมในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งเกิดปรากฏการณ์สเปรตเอฟเกิดขึ้น โดยจะทำการวัดจากขอบด้านในของค่าความถี่ซึ่งพอมองเห็นได้ชัดเจน โดยจะใส่ สัญลักษณ์  $F$  ไว้ด้วย รูปที่ 3.9 (ช) คล้ายกับรูปที่ 3.9 (ฉ) แต่เปลี่ยนเป็นการวัดจากขอบที่อยู่รอบนอกแทน โดยค่า  $f_{oF2}$  अनुमानได้จาก  $f_{xF2}$  และจะมีการใส่สัญลักษณ์  $J$  และ  $F$  ไว้ด้วย และในรูปที่ 3.9 (ซ) แสดงภาพไอโอโนแกรมที่ไม่สามารถทำการบันทึกค่าได้ที่ความถี่สูงกว่า 16.7 เมกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากความกว้างความถี่ไม่ควรสูงเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของค่า  $f_{oF2}$

### 3.3 วิธีการใช้โปรแกรม Special Scaling

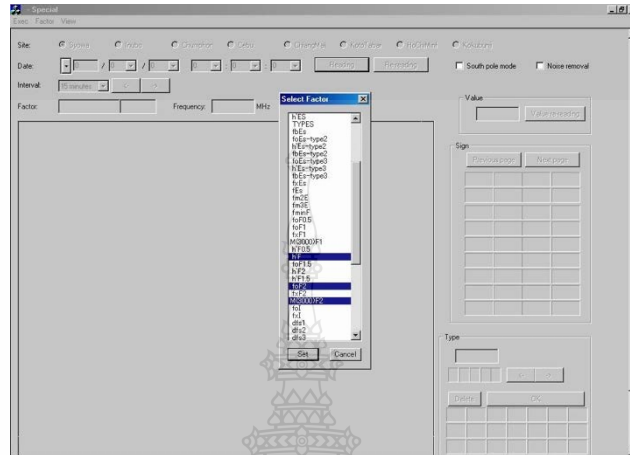
หลังจากที่เราได้ทราบรูปแบบพื้นฐานการอ่านค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว ได้แก่  $h'F$ ,  $f_{oF2}$  และ  $M(3000)F2$  จากไอโอโนแกรมที่พบได้บ่อยในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยการใช้อยู่มีวิธีการอ่านค่าจากภาพ ไอโอโนแกรมในหัวข้อที่ 3.2 แล้ว ในหัวข้อนี้ทำการนำเสนอการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 3 ตัว โดยใช้โปรแกรม Special scaling ซึ่งวิธีการใช้งานโปรแกรม Special scaling ในการเก็บค่าพารามิเตอร์  $h'F$ ,  $f_{oF2}$  และ  $M(3000) F2$  มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1. ทำการเปิดโปรแกรม Special-100-2000-eng.exe ซึ่งติดตั้งในเครื่องคอมพิวเตอร์มีลักษณะดังนี้



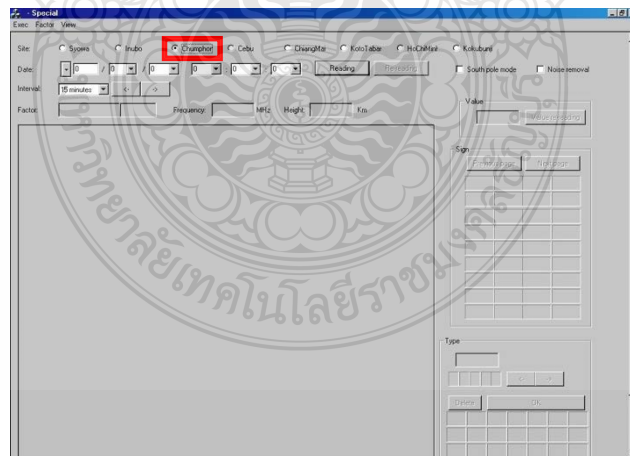
รูปที่ 3.10 ลักษณะหน้าต่างของโปรแกรม Special scaling

3.3.2. ทำการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการเก็บ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ จากไอโอโนแกรมจำนวน 3 ตัวคือ  $h F$ ,  $foF2$  และ  $M(3000)F2$  สามารถแสดงดังรูปที่ 3.10



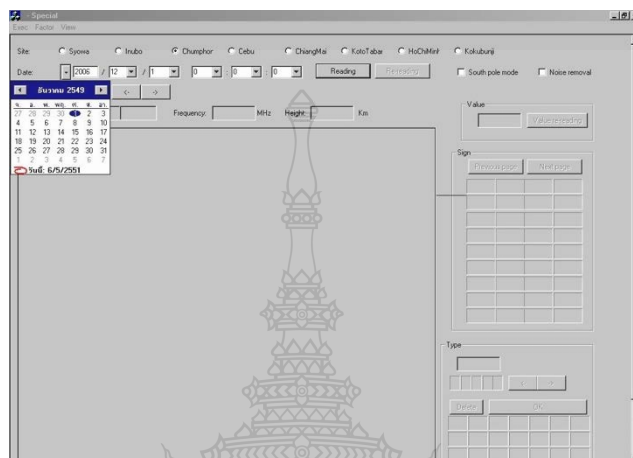
รูปที่ 3.11 การเลือก  $M(3000)F2$  จากโปรแกรม Special scaling

3.3.3. ต่อจากนั้นทำการเลือกสถานี โดยในวิทยานิพนธ์นี้เครื่องวัดตั้งอยู่ที่ยกตัวอย่างโดยใช้ สถานีชุมพร ประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณละติจูดต่ำ



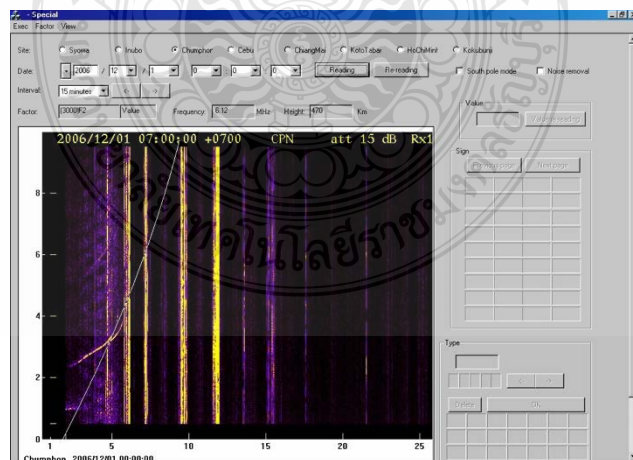
รูปที่ 3.12 การเลือกสถานที่ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากโปรแกรม Special scaling

3.3.4. จากนั้น ทำการเลือกวัน เวลา และปีที่ต้องการเก็บ โดยจากรูปเป็นตัวอย่างการเก็บ ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัวเลือกวันที่ต้องการเก็บข้อมูล จากนั้นกด Reading เพื่อเริ่มอ่านค่า ซึ่งสามารถ แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 การเลือกวัน เดือน และปีทำการเก็บพารามิเตอร์จากโปรแกรม Special scaling

3.3.5. ยกตัวอย่างเริ่มทำการเก็บวัดค่าพารามิเตอร์โดยโปรแกรมจะเริ่มเก็บค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 การเก็บวัดค่าพารามิเตอร์โดยโปรแกรม Special scaling



รูปที่ 3.14 เป็นตัวอย่างการวัดค่า M(3000)F2 ของวันที่ 1 ธันวาคม ค.ศ. 2006 ในเวลา 07.00 น. จากสถานีชุมพร โดยการวัดค่า M(3000)F2 จากโปรแกรม Special สามารถทำได้โดยการนำเส้นส่วนโค้งของโปรแกรมไปสัมผัสกับเส้นส่วนโค้งของความถี่สามัญ (อธิบายในหัวข้อ 3.2) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 นั้นเอง ส่วนค่า M(3000)F2 ที่วัดได้สามารถดูได้จากการทำการ บันทึกแล้วเปิดดูจาก wordpad โดยจากภาพ 3 ค่า M(3000) F2 มีค่า 17.2 เมกะเฮิรตซ์

การเปลี่ยนแปลงของภาพไอโอโนแกรมในแต่ละช่วงเวลา ในแต่ละวัน หรือแต่ละเดือน จะแตกต่างกันออกไป ซึ่งได้ทำการยกตัวอย่างภาพไอโอโนแกรมที่พบเห็นได้บ่อยในช่วงเวลาต่าง ๆ ของค่าพารามิเตอร์แล้วในหัวข้อที่ 3.2

ในวิทยานิพนธ์ทำการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์จากไอโอโนแกรมในช่วงทุก ๆ 15 นาที โดยใช้โปรแกรม Special scaling ในการเก็บข้อมูล ดังนั้นภายใน 1 วันจะประกอบด้วยภาพไอโอโนแกรมจำนวน 96 รูป ที่ต้องทำการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ซึ่งได้ทำการเก็บ ข้อมูลภายในระยะเวลา 4 ปี นำค่าที่ทำการเก็บได้ซึ่งเป็นไฟล์ awk มาทำการเขียน Macro ใน Microsoft Excel เพื่อ ดึงค่าพารามิเตอร์ออกมาทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายเดือน ฤดูกาล และรายปีต่อไป ซึ่งผลการวิเคราะห์. การเปลี่ยนแปลงของพระอาทิตย์ที่มีปฏิกิริยาต่ำและการเปลี่ยนแปลงของพระอาทิตย์ที่มีปฏิกิริยาสูง พารามิเตอร์แสดงไว้ในบทที่ 4 นั้นเอง

### 3.4 วิธีเก็บข้อมูล IRI

IRI model (International Reference Ionosphere) คือแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลของตัวแปรต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามความแตกต่างของชุดคำสั่ง คือ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Radio Consultative Committee (CCIR,1966) [22] และ แบบจำลองที่ถูกพัฒนาและรับรองโดย The International Union of Radio Science (URSI,1989) [2] ซึ่งจะถูกพัฒนาเวอร์ชันตลอดเวลาพัฒนาในปีล่าสุดในปี 2016 ถูกเรียกว่า แบบจำลอง IRI-2016 [15] โดยสามารถเก็บข้อมูลผ่านเว็บไซต์ [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php) ดังรูปที่ 3.15 เว็บไซต์จะเก็บข้อมูลแบบจำลอง IRI-2016 โดยที่เราเลือกเก็บข้อมูลตาม วัน เวลา สถานที่ เราไปถึงระบุขนาดของความสูงชั้นบรรยากาศและพิกัดที่ละติจูดสูงและต่ำ จากนั้นทำการเลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการซึ่งที่เราต้องการคือพารามิเตอร์ hmF2 ที่มีทั้งหมด 3 เลือกในการทำนายค่าพารามิเตอร์ hmF2 ได้แก่ BSE-1979,

AMTB-2013 และ SHU-2015 ซึ่งทั้ง 3 เลื่อนมีที่มาและความสำคัญดังหัวข้อที่ 2.7 และดาวนโหลดข้อมูลเพื่อทำการวิเคราะห์ต่อไป

### 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](#)

[Help](#)

#### Select Date and Time

Year (1958-2020): 2000

Month: January Day(1-31): 01

**Notice!** If date is outside the Ap index range (1958/02/14-2021/7/11), 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 (60. - 2000. km) Start 100. Stop 2000. Stepsize 50.

[Submit](#) [Reset](#)

#### 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 (110. - 10000. 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](#) [no-95](#)

Te Topside [TBT2012+SA](#) [Ion Composition](#) [RBV10/TBT15](#)

รูปที่ 3.15 เว็บไซต์เก็บข้อมูล IRI [15]

## 3.5 การวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม MATLAB

เมื่อได้ข้อมูลจากการเก็บค่าโดยโปรแกรม special scaling และข้อมูล IRI model-2016 แล้วนั้นจะนำมาวิเคราะห์โดยโปรแกรม Matlab เป็นโปรแกรมสำหรับการคำนวณเชิงตัวเลขและ visualization ที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งการทำงานภายในโปรแกรม Matlab สามารถทำงานแบบตอบโต้ซึ่งคล้ายกับภาษา C และ Pascal นอกจากนี้ยังสามารถใช้ Matlab เป็นเสมือนเครื่องคิดเลขทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ระดับสูงได้อย่างรวดเร็วการใช้โปรแกรม Matlab สามารถทำได้ง่ายเมื่อเทียบกับโปรแกรมอื่น ๆ สามารถสร้างและกำหนดค่าตัวแปรได้ทันทีโดยไม่ต้องประกาศตัวแปรก่อน ข้อมูลไม่ว่าจะเป็นตัวเลขหรือตัวอักษร (string) จะถูกจัดเก็บในรูปแบบของแถวและหลัก หรือ array ซึ่งก็คือ matrix นั่นเอง เช่น จำนวนสเกลลาร์ (scalar) จะถูกแทนด้วยเมตริกซ์ขนาด 1x1 ข้อมูลที่เป็นเวกเตอร์จะถูกแทนที่ด้วยเมตริกซ์ที่มีเพียง 1 แถว ในกรณีที่เป็นเวกเตอร์แบบแถว (Row vector) หรือถูกแทนที่ด้วยเมตริกซ์ที่มีเพียง 1 หลัก ในกรณีที่เป็นเวกเตอร์แบบหลัก (Column vector) เป็นต้น การที่ Matlab ออกแบบมาให้มีการทำงานเช่นนี้ทำให้การเขียนโปรแกรมแก้โจทย์ปัญหาที่มีลักษณะของ vector และ matrix เป็นเรื่องง่ายความสามารถของโปรแกรม Matlab เบื้องต้นมี ดังนี้

- Matlab เป็นโปรแกรมเพื่อการคำนวณและแสดงผลได้ทั้งตัวเลขและรูปภาพที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำการเขียนกราฟได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- สามารถควบคุมการทำงานของ Matlab ด้วยชุดคำสั่ง (command line) และยังสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรม (script file) ได้ด้วย
- ลักษณะการเขียนโปรแกรมใน Matlab จะใกล้เคียงการเขียนสมการในคณิตศาสตร์ จึงง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C, Pascal, Fortran และอื่น ๆ
- Matlab มีฟังก์ชันสำเร็จรูป (built-in function) เพื่อทำงานเฉพาะทางมากมาย นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถเขียนฟังก์ชันขึ้นมาใหม่โดยใช้ประโยชน์จากฟังก์ชันที่มีอยู่เดิมได้ เพื่อให้เหมาะสมกับงานของผู้ใช้แต่ละกลุ่มสำหรับผู้ใช้ที่ต้องการใช้งานเฉพาะทางขั้นสูง เช่น งานด้าน Control, Image Processing, Artificial Neural Network หรืออื่น ๆ Matlab ก็มี toolbox หรือชุด function พิเศษเพื่อทำงานเฉพาะทางนั้น ๆ ด้วย
- Matlab สามารถเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลแบบ Dynamic Link กับโปรแกรมอื่น ๆ ได้ เช่น Excel หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองจากภาษา C หรือ Visual Basic ที่ร่วมทำงานอยู่บนปฏิบัติการ Windows

การเขียนคำสั่งที่ใช้วิเคราะห์ผลในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงค่าเฉลี่ยรายปี รายเดือน และค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่เก็บกับข้อมูลจาก IRI model

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความถี่สูงสุดที่สามารถใช้งาน ได้ระยะทาง 3,000 กิโลเมตร และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศ ไอโอโนสเฟียร์เทียบกับแบบจำลอง IRI-2016

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์  $M(3000)F2$  และค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยทำงานวิเคราะห์ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2010 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2018 เพื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน รายฤดูกาล และรายปี โดยที่พารามิเตอร์  $M(3000)F2$  สามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโอโนแกรมที่บันทึกด้วยเครื่อง Ionosonde จากสถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร สถานีโกโตตาบัง

ในขณะที่ค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 หรือ  $hmF2$  หมายถึงบริเวณ ที่แสดงความสูงสูงสุดของชั้น F2 และเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงที่สุดเช่นเดียวกัน ตัวแปร  $hmF2$  นี้ได้มาจากการคำนวณตามสมการของ Shimazaki โดยอาศัยตัวแปร  $M(3000)F2$  ซึ่งทำการเก็บวัดได้จากภาพไอโอโนแกรมที่ถูกบันทึกด้วยเครื่องไอโอโนซอนด์ที่ตั้งแสดงในสมการที่ 4.1 และค่าเปอร์เซ็นต์ส่วนเบี่ยงเบน  $PD_{hmF2}$  (%) ระหว่างค่าที่สังเกตได้กับค่าแบบจำลอง IRI-2016 คำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$hmF2 = [1490 / M(3000)F2] - 176 \quad (4.1)$$

$$PD_{hmF2} (\%) = [(hmF2_{IRI} - hmF2_{obs}) / hmF2_{obs}] \times 100\% \quad (4.2)$$

โดยที่  $hmF2_{IRI}$  คือค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ที่ได้จากแบบจำลอง IRI-2016 ในขณะที่ค่า  $hmF2_{obs}$  คือค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 4.2

## 4.1 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 หรือ hmF2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สามารถคำนวณหาได้จาก สมการที่ 4.2 ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 โดยทำการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2018 และทำการศึกษาจากสถานีไอโอโนซอนด์ทั้งหมด 3 สถานีคือ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย

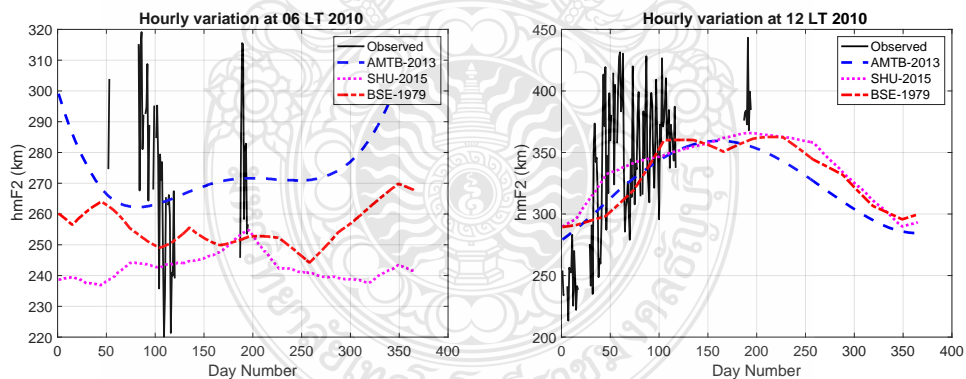
### 4.1.1 สถานีเชียงใหม่

สถานีเชียงใหม่เป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา ชื่อย่อสถานีคือ CMU โดยเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 18.76 องศาเหนือ เส้นแวง 98.93 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้ง แม่เหล็ก 12.7 องศาเหนือ โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบชั่วโมง รายวัน รายเดือน รายปี รวมถึงความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง

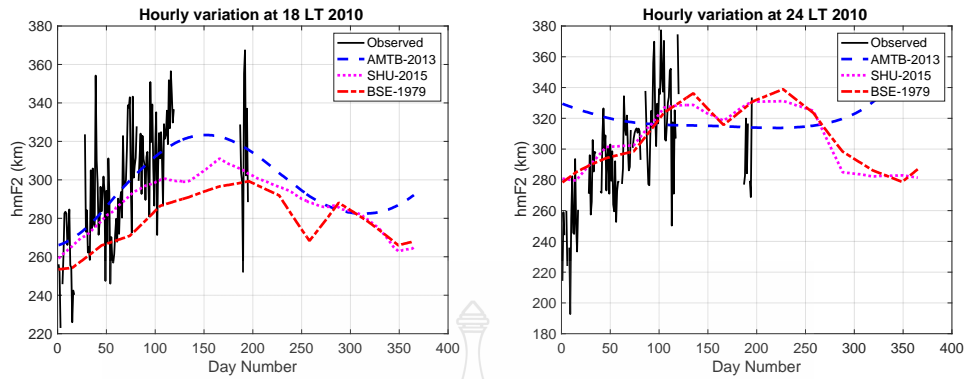
#### 4.1.1.1. เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมงของสถานีเชียงใหม่

ผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมง ซึ่งกำหนดเลือกปีในช่วงปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ (ปี ค.ศ. 2010) และปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์สูง (ปี ค.ศ. 2015) แสดงความผันแปรรายชั่วโมงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่สังเกตได้เปรียบเทียบกับค่าที่คาดการณ์ได้จาก 3 ตัวเลือก BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ของแบบจำลอง IRI-2016 ที่สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2010 แสดงดังรูปที่ 4.1 และ ปี ค.ศ. 2015 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ hmF2 ในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น (06LT), เวลาเที่ยงวัน (12LT), พระอาทิตย์ตก (18LT) และเที่ยงคืน (00LT) ตามลำดับ hmF2 ที่สังเกตพบจะแสดงโดยเส้นทึบสีดำ ในขณะที่ตัวเลือก hmF2 ที่คาดการณ์ไว้โดย AMTB-2013, SHU-2015 และ BSE-1979 จะแสดงตามลำดับสำหรับเส้นประสีน้ำเงิน เส้นประสีม่วงแดง และเส้นประสีแดง แสดงจากรูปที่ 4.1 ผลลัพธ์ในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น (06LT) แสดงว่าตัวเลือก AMTB-2013 อยู่ใกล้กับ พารามิเตอร์ hmF2 ที่สังเกตได้ ในขณะที่ทั้งตัวเลือก SHU-2015 และ BSE-1979 ประเมินค่าที่วัดต่ำเกินไป ค่าพารามิเตอร์ hmF2 อยู่ระหว่าง 230-450 กม. ในเวลาเที่ยงวัน (12LT) ผลลัพธ์แสดงว่าตัวเลือก BSE-1979 AMTB-2013 และ SHU-2015 ใกล้เคียงกับที่สังเกตได้ แสดงค่าที่ต่ำกว่าจากวันที่ 90 ถึง

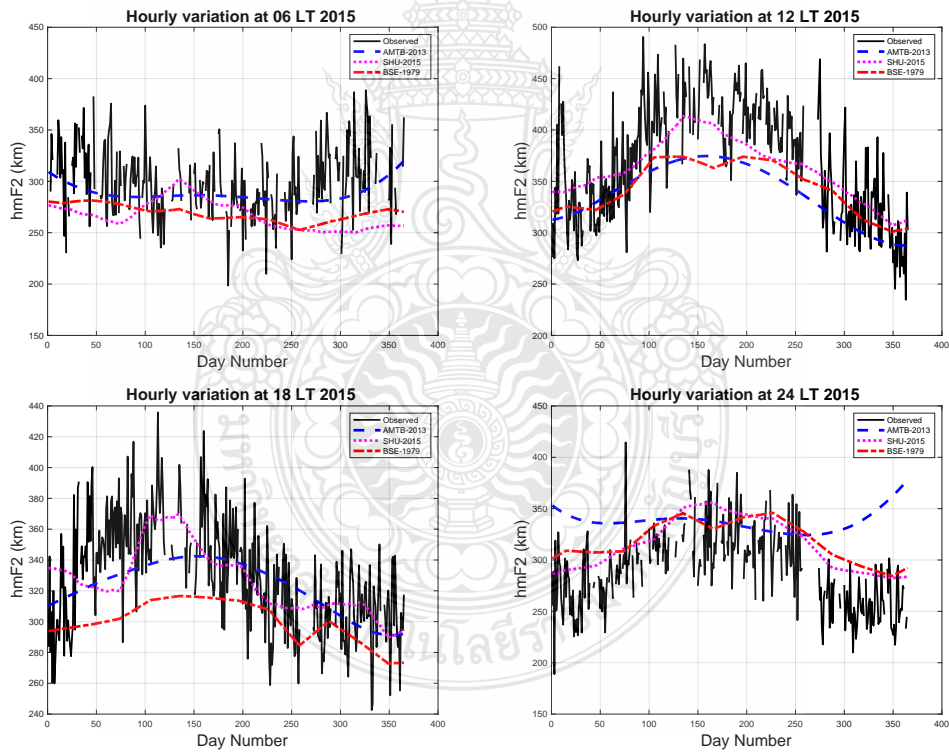
100 ค่า  $hmF2$  แตกต่างกันไปตั้งแต่ 230 กม. ถึง 430 กม. ในช่วงพระอาทิตย์ตก (18LT) ทั้งตัวเลือก AMTB-2013 และ SHU-2015 คาดการณ์  $hmF2$  ให้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้ แต่ตัวเลือก BSE-1979 แสดงการประมาณค่าต่ำไปในระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 180 ค่า  $hmF2$  จะแตกต่างกันไปในช่วง 220 กม. ถึง 360 กม. สำหรับเที่ยงคืน (00LT หรือ 24LT) ตัวเลือก 3 เหล่านี้คาดการณ์  $hmF2$  สูงเกินไปเมื่อเทียบกับ  $hmF2$  ที่สังเกตได้ ค่า  $hmF2$  แตกต่างกันไปตั้งแต่ 200 กม. ถึง 380 กม. ผลลัพธ์ในปี ค.ศ. 2015 แสดงดังภาพที่ 4.2 ผลลัพธ์เมื่อพระอาทิตย์ขึ้น (06LT) แสดงว่าตัวเลือก AMTB-2013 อยู่ใกล้กับ  $hmF2$  ที่สังเกตได้ ในขณะที่ทั้งตัวเลือก SHU-2015 และ BSE-1979 ประเมินค่าที่วัดต่ำเกินไปค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  อยู่ระหว่าง 250 กม. ถึง 400 กม. ในเวลาเที่ยงวัน (12LT) ผลลัพธ์แสดงว่าตัวเลือก BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ใกล้เคียงกับที่สังเกตได้ แสดงค่าที่ต่ำกว่าจากวันที่ 100 ถึงวันที่ 250 ค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  แตกต่างกันไปตั้งแต่ 230 กม. ถึง 450 กม. ในช่วงพระอาทิตย์ตก (18LT) ทั้งตัวเลือก AMTB-2013 และ SHU-2015 คาดการณ์  $hmF2$  ให้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่วัดได้ แต่ตัวเลือก BSE-1979 แสดงการประมาณค่าต่ำไปในระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 200 ค่า  $hmF2$  จะแตกต่างกันไปในช่วง 260 กม. ถึง 400 กม. สำหรับเที่ยงคืน (00LT หรือ 24LT) 3 ตัวเลือกเหล่านี้คาดการณ์  $hmF2$  สูงเกินไปเมื่อเทียบกับ  $hmF2$  ที่สังเกตได้ ค่า  $hmF2$  แตกต่างกันไปตั้งแต่ 200 กม. ถึง 380 กม.



รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมงของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ.2010



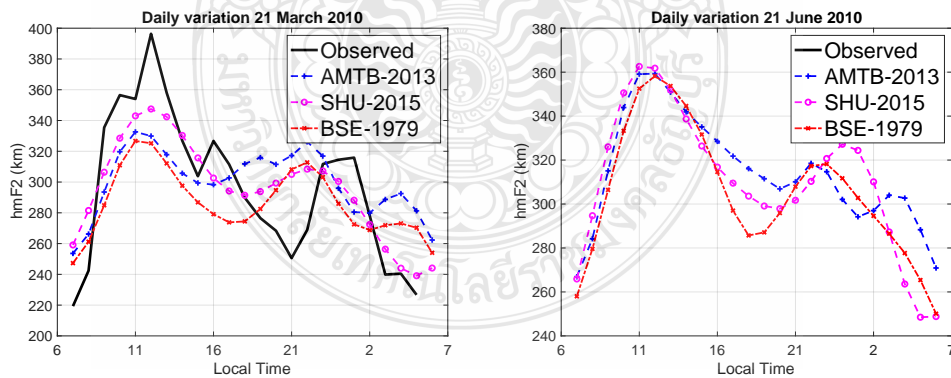
รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมงของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ.2010 (ต่อ)



รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมงของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ.2015

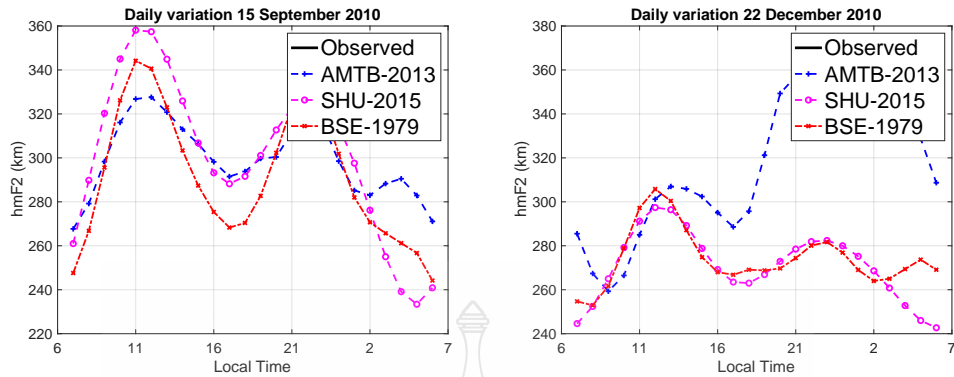
#### 4.1.1.2. เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายวันของสถานีเชียงใหม่

แสดงให้เห็นถึงรูปแบบรายวันของการสังเกต hmF2 และการทำนายแบบจำลอง IRI-2016 จากแผนผังซ้ายไปขวาของรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบ hmF2 ในวันที่ 21 มีนาคม 2010, 20 มิถุนายน 2010, 15 กันยายน 2010 และ 22 ธันวาคม 2010 ตามลำดับ hmF2 ที่สังเกตได้จะแสดงเป็นของแข็งสีดำ ตัวเลือก AMTB-2013, SHU-2015 และ BSE-1979 ที่คาดการณ์ไว้จะแสดงด้วยเส้นเครื่องหมายบวกสีน้ำเงิน เส้นประสีม่วงแดง และเส้นประ กากบาทสีแดงต่อเนื่องกัน ผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นความผันแปรที่คล้ายคลึงกันระหว่างการสังเกตและการคาดการณ์ว่าค่า hmF2 เพิ่มขึ้นก่อนเวลาพระอาทิตย์ขึ้น 06.00 น ความสูงสูงสุดจะเกิดขึ้นในเวลาเที่ยง 12.00 น. หลังจากนั้นค่า hmF2 จะลดลงจนกระทั่งระดับต่ำสุดเกิดขึ้น ประมาณ 05.00 น. ผลลัพธ์ในวันที่ 21 มีนาคม 2010 แสดง 3 ตัวเลือกของแบบจำลองที่ประเมินค่าต่ำไปในช่วงกลางวันและประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้ ในวันอื่น ๆ ผลลัพธ์จะคล้ายกับผลลัพธ์ในวันที่ 21 มีนาคม 2010 แต่ส่วนสูงจริงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ผลลัพธ์ในปี ค.ศ.2015 ดังรูปที่ 4.4 ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นความผันแปรที่คล้ายคลึงกันกับปี ค.ศ.2010 กล่าวคือค่าพารามิเตอร์ hmF2 เพิ่มขึ้นเวลาพระอาทิตย์ขึ้นความสูงสูงสุดจะเกิดขึ้นในเวลาเที่ยงวันหลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ hmF2 จะลดลงจนถึงจุดต่ำสุดก่อนพระอาทิตย์ขึ้น ผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันแสดง ทั้ง 3 ตัวเลือกของแบบจำลองที่ประเมินค่าต่ำไปในช่วงกลางวันและประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้

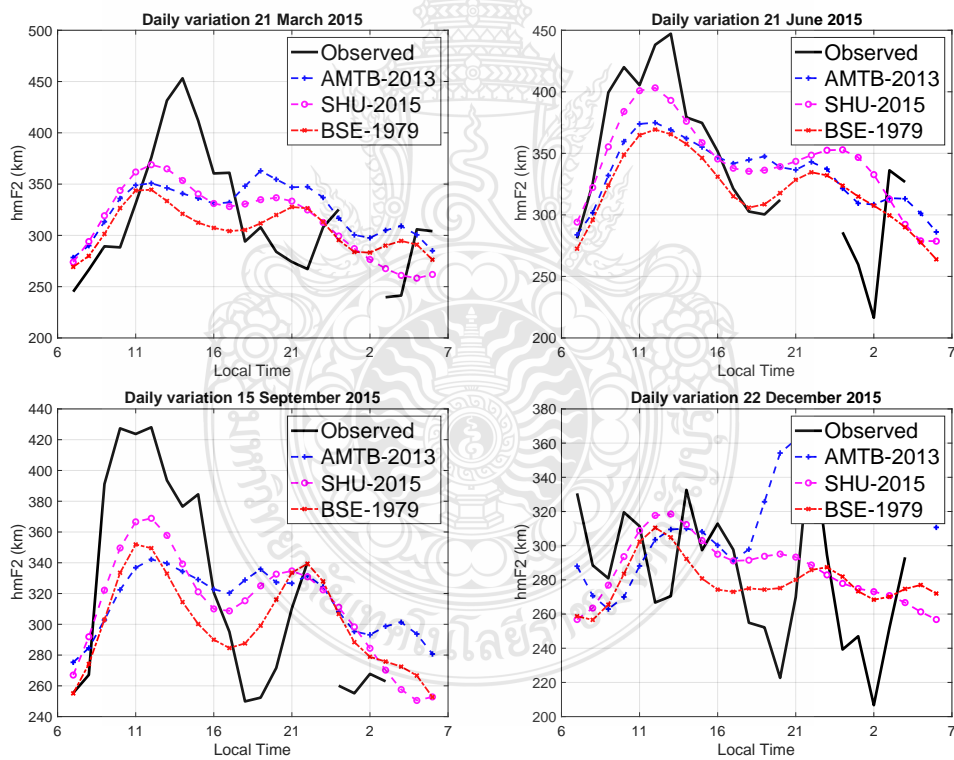


รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวันของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010





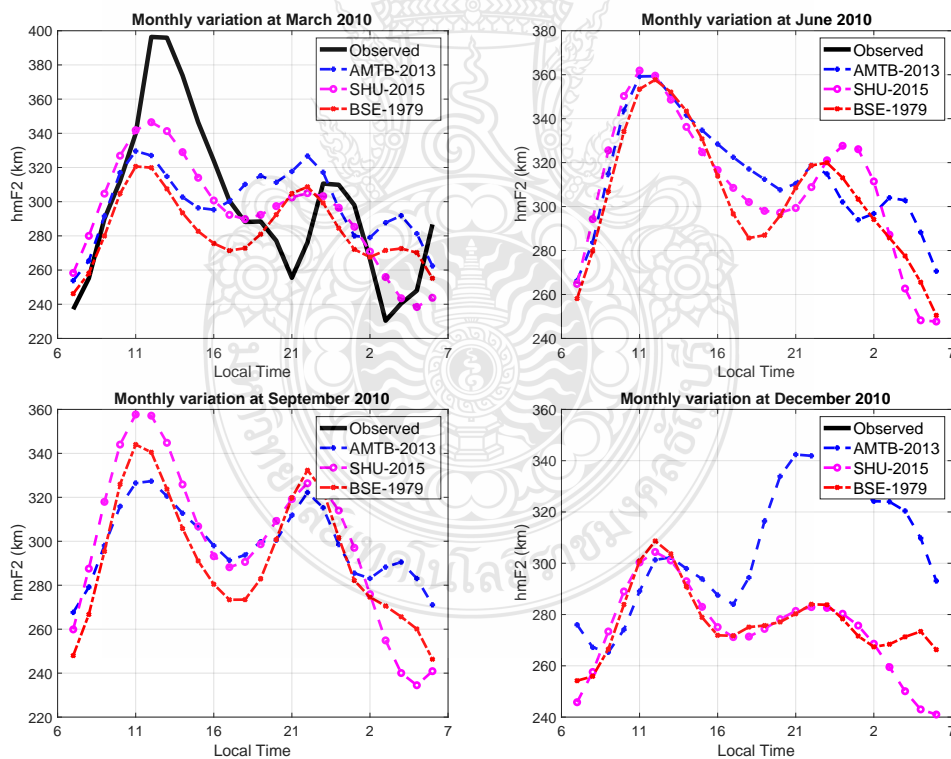
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010 (ต่อ)



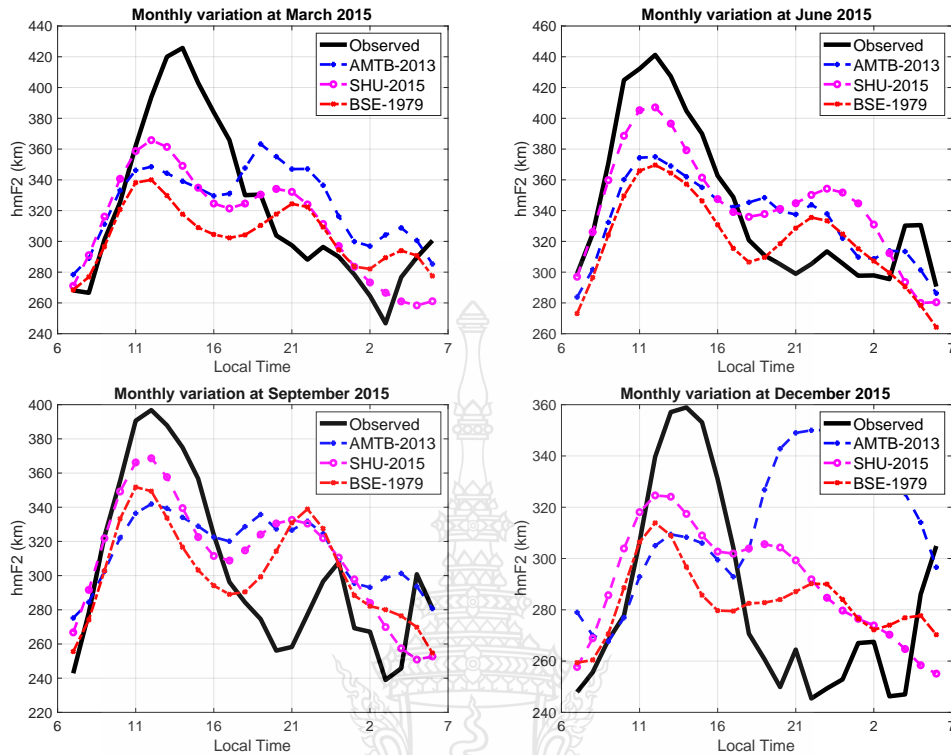
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวัน ของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015

#### 4.1.1.3. เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายเดือนของสถานีเชียงใหม่

รูปที่ 4.5 ผลลัพธ์จะคล้ายกับผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบรายวัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่คาดการณ์ไว้จะต่ำกว่าในช่วงกลางวันและจะประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืน ค่า hmF2 ในเดือนมีนาคมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 240 กม. ถึง 400 กม. ในขณะที่ในเดือนมิถุนายนจะเปลี่ยนระหว่าง 260 กม. ถึง 360 กม. ระดับ hmF2 ในเดือนกันยายน ปรับเปลี่ยนในช่วง 230 กม. ถึง 360 กม. ในเดือนธันวาคม ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ hmF2 จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 240 กม. ถึง 300 กม. รูปที่ 4.6 โดยที่ค่า hmF2 ที่คาดการณ์ไว้จะคาดการณ์ผิดพลาดในช่วงกลางวันและจะประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืน ค่า hmF2 ในเดือนมีนาคมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 250 ถึง 430 กม. ในขณะที่ในเดือนมิถุนายนจะเปลี่ยนระหว่าง 260 กม. ถึง 440 กม. ระดับ hmF2 ในเดือนกันยายน ปรับเปลี่ยนในช่วง 240 กม. ถึง 400 กม. ในเดือนธันวาคม ข้อมูล hmF2 จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 245 กม. ถึง 360 กม. อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับทั้ง 3 ตัวเลือก



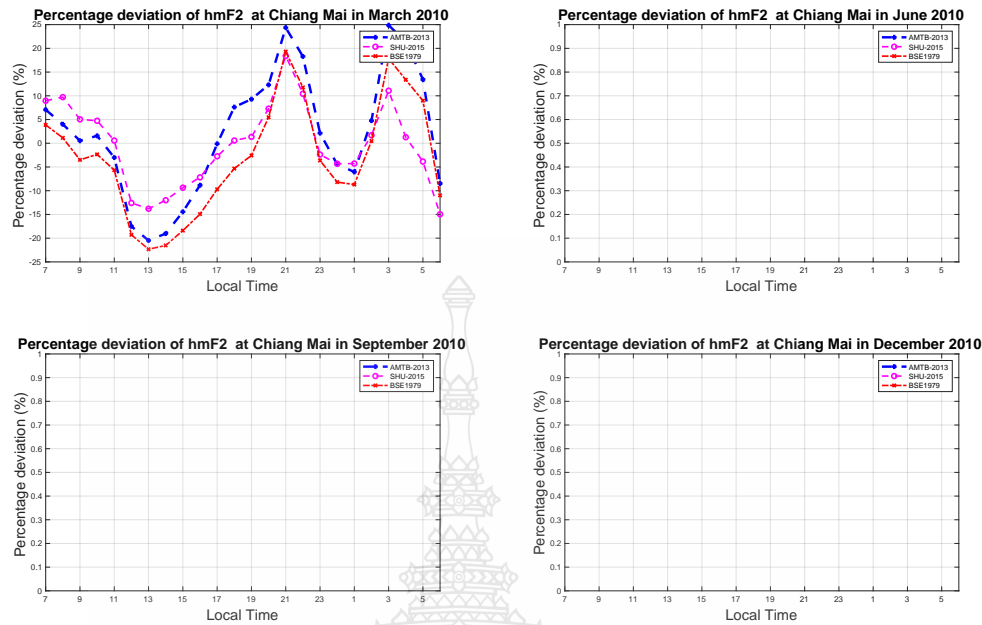
รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายเดือนของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010



รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายเดือนของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015

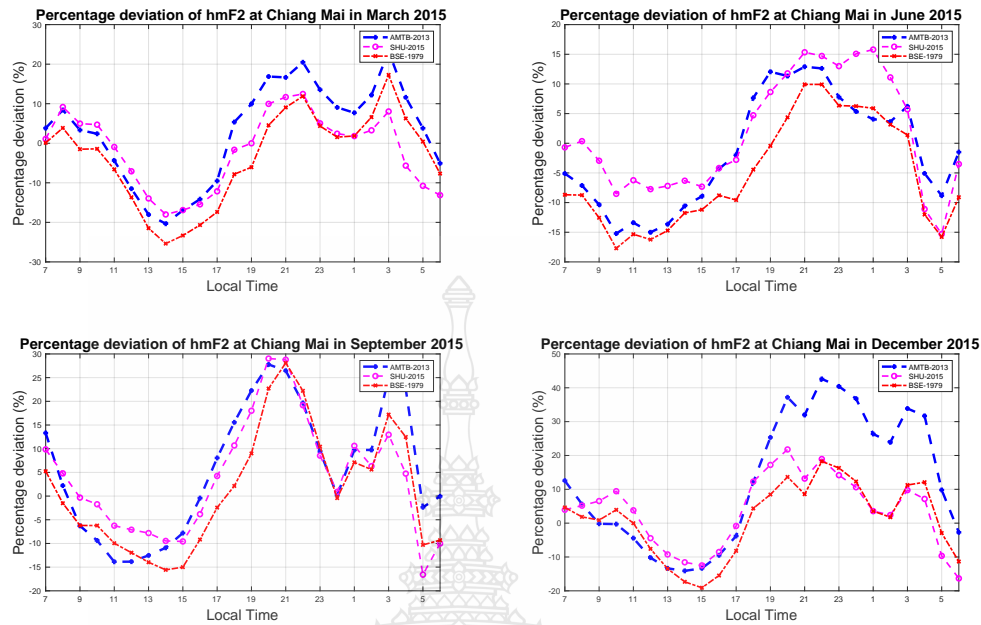
4.1.1.4. เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $hmF2$  แบบรายฤดูกาล สถานีเชียงใหม่

โดยแบ่งออกเป็นฤดูตามตำแหน่งของพระอาทิตย์เป็นหลักออกมาเป็น 4 ฤดู ได้แก่ March Equinox (มีนาคม เมษายน), June Solstice (พฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม), September Equinox (กันยายน ตุลาคม) และ December Solstice (พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์) โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  แสดงดังรูปที่ 4.7 และแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายฤดูกาลของสถานีใหม่ปี ค.ศ. 2010

จากรูปที่ 4.7 ผลลัพธ์ในเดือนมีนาคมปี ค.ศ. 2010 บ่งชี้ว่า %PD ตัวเลือกของ BSE-1979 และ AMTB-2015 มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ -20% และ SHU-2015 มีค่าอยู่ที่ -15% ในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลากลางคืนทั้ง 3 ตัวเลือกจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 20% กล่าวคือ ทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืน จากรูปที่ 4.8 ผลลัพธ์ในเดือนมีนาคมปี ค.ศ. 2015 บ่งชี้ว่า ตัวเลือกทั้ง 3 ตัวเลือกมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันทั้งในเวลากลางวันและในช่วงเวลากลางคืน กล่าวคือ จะคาดการณ์ต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืนค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ -20% ถึง 20% เช่นเดียวกับเดือน มิถุนายน และกันยายน เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ  $\pm 15\%$  ในเดือนธันวาคมว่าจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง  $\pm 20\%$  เฉพาะ BSE-1979 และ SHU-2015 ซึ่ง AMTB-2015 จะคาดการณ์ค่อนข้างผิดพลาดในช่วงเวลากลางคืน เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ 40%



รูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายฤดูกาลของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2015

แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ของสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่เวลา 06.00 น. จนถึงเวลา 05.00 น. แบบรายฤดูกาลในช่วงปี ค.ศ. 2010 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.1 และ ปี ค.ศ. 2015 แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่ได้จากการเก็บข้อมูลที่สถานีเชียงใหม่ ซึ่งเก็บค่าได้ เฉพาะช่วงฤดู March Equinox และ June Solstice ในปี ค.ศ. 2010 เนื่องจาก  $M(3000)F2$  ไม่สามารถ เก็บค่าได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ผลลัพธ์ในตารางที่ 4.1 และ ตารางที่ 4.2 จะแสดงค่าของพารามิเตอร์  $hmF2$  จะมีค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงแต่ละฤดูกาลเทียบกับค่าเฉลี่ยของแต่ละแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก พบว่ามีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน ในที่ละรายชั่วโมงคือ  $hmF2$  ที่ได้จาก แบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือกจะทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันหรือประมาณ 6.00 น.จนถึง 17.00 หรือก่อนช่วงพระอาทิตย์ตกและทำนายสูงไปในช่วงเวลาพระอาทิตย์ตก สังเกตให้เห็นว่าในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015 ในเวลากลางวันช่วงฤดูการ June Solstice จะมีค่าที่สูงกว่าในฤดูกาลอื่น ๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีเชียงใหม่  
ในปี ค.ศ.2010

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ.2010																
ราย ชั่วโมง (น.)	March Equinox				June Solstice				September Equinox				December Solstice			
	(มีนาคม-เมษายน)				(พฤษภาคม-สิงหาคม)				(กันยายน-ตุลาคม)				(พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)			
	IRI-2016 model				IRI-2016 model				IRI-2016 model				IRI-2016 model			
	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
06.00	282	322	327	345	395	368	327	371	NaN	343	327	357	NaN	306	301	299
07.00	302	310	315	339	377	361	315	366	NaN	327	321	346	NaN	301	306	297
08.00	301	296	303	327	350	349	303	353	NaN	308	313	328	NaN	288	304	290
09.00	301	285	296	312	324	334	296	335	NaN	293	306	309	NaN	276	300	280
10.00	286	277	295	300	305	317	295	317	NaN	281	298	295	NaN	269	293	270
11.00	263	272	300	292	291	298	300	303	NaN	273	292	288	NaN	268	287	265
12.00	238	273	310	290	291	285	310	296	NaN	274	294	291	NaN	271	295	265
13.00	228	281	315	293	279	285	315	296	NaN	284	300	299	NaN	270	320	269
14.00	257	292	311	298	259	295	311	302	NaN	300	301	309	NaN	271	345	274
15.00	266	305	318	304	280	311	318	313	NaN	319	312	318	NaN	276	353	279
16.00	238	310	327	307	306	325	327	324	NaN	329	322	323	NaN	281	350	282
17.00	252	301	317	306	305	330	317	330	NaN	322	315	320	NaN	282	352	282
18.00	270	286	296	299	301	324	296	328	NaN	303	299	311	NaN	277	356	280
19.00	277	273	280	287	263	313	280	316	NaN	286	286	295	NaN	269	353	275
20.00	268	268	279	272	229	303	279	297	NaN	276	283	275	NaN	265	349	269
21.00	247	271	288	256	244	293	288	276	NaN	271	289	256	NaN	266	346	260
22.00	229	272	292	243	253	283	292	257	NaN	266	291	241	NaN	270	338	252
23.00	221	270	281	238	286	271	281	248	NaN	260	283	235	NaN	274	324	245
24.00	NaN	256	263	243	257	252	263	252	NaN	246	271	241	NaN	268	305	242
1.00	249	247	254	258	257	257	254	269	NaN	249	268	259	NaN	255	283	245
2.00	234	259	266	281	298	280	266	294	NaN	267	279	286	NaN	254	267	254
3.00	252	281	292	306	319	308	292	323	NaN	295	298	315	NaN	263	261	267
4.00	244	306	317	327	349	337	317	348	NaN	326	316	341	NaN	280	268	281
5.00	249	322	329	341	386	361	329	365	NaN	345	326	355	NaN	298	286	293

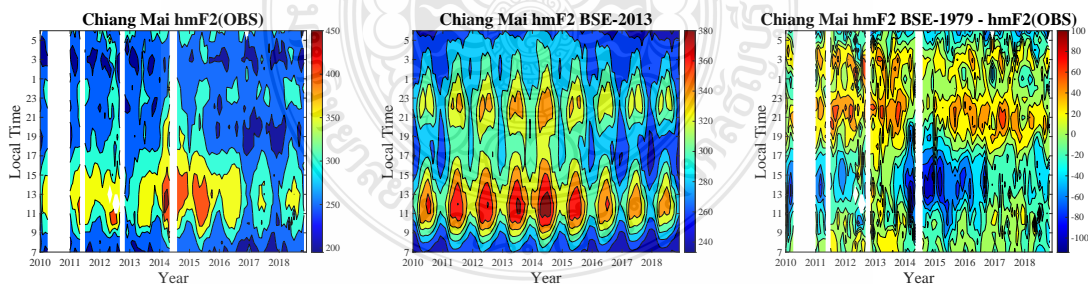
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีเชียงใหม่  
ในปี ค.ศ.2015

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ.2015																
ราย ชั่วโมง (น.)	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)				June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)				September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)				December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)			
	Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model		
		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
06.00	419	333	344	364	419	365	369	395	386	337	339	359	361	306	309	320
07.00	420	320	339	353	401	357	362	378	372	319	334	342	364	293	309	313
08.00	404	311	335	339	392	345	355	361	366	305	329	324	350	282	307	304
09.00	383	306	330	329	371	331	347	348	333	295	322	312	331	276	300	297
10.00	363	303	331	326	350	315	342	341	302	289	320	309	305	275	292	294
11.00	332	304	348	329	328	306	345	340	279	291	328	314	266	277	299	295
12.00	331	310	363	333	307	309	348	342	270	300	336	323	246	276	326	297
13.00	302	317	355	335	306	318	340	344	254	314	327	330	239	277	351	298
14.00	296	324	347	332	310	329	337	348	266	330	327	332	259	282	359	295
15.00	288	324	347	323	303	336	344	351	273	336	332	329	253	287	358	290
16.00	299	312	337	310	319	333	338	353	303	327	325	320	256	288	363	283
17.00	295	295	317	297	311	325	322	352	309	308	308	309	263	282	366	278
18.00	280	284	300	285	296	315	310	345	274	292	296	297	276	274	362	275
19.00	263	283	297	276	293	308	308	331	261	284	293	283	276	269	355	273
20.00	252	289	304	268	299	300	314	312	243	280	299	269	243	271	350	271
21.00	283	294	309	262	321	291	313	293	271	276	301	257	259	275	341	266
22.00	296	291	301	259	328	278	301	281	303	270	294	251	286	277	327	261
23.00	303	277	285	262	294	265	286	282	288	255	281	253	301	272	307	257
24.00	265	269	278	273	298	273	284	297	242	256	275	266	251	259	286	257
1.00	272	278	289	293	327	296	302	325	281	275	284	290	253	258	270	265
2.00	307	298	311	317	365	324	332	358	320	303	302	319	273	267	264	279
3.00	327	323	333	342	417	350	360	386	363	333	322	347	272	285	272	296
4.00	361	340	346	360	427	366	374	403	387	353	336	365	295	303	289	311
5.00	397	342	349	368	435	370	375	405	403	352	342	369	335	311	304	320

4.1.1.5. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกที่สถานีเชียงใหม่

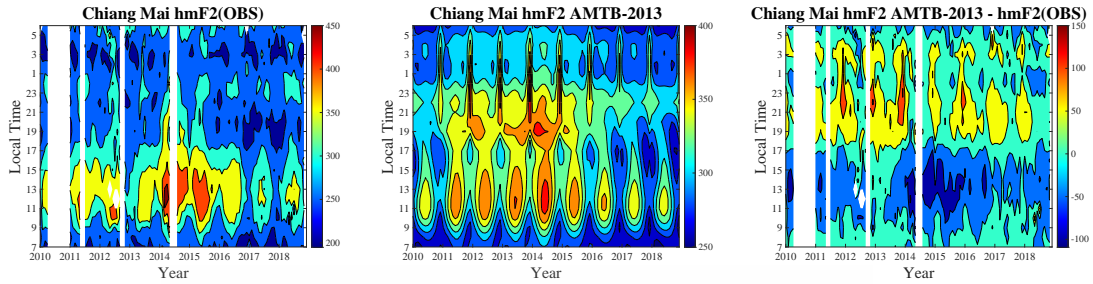
ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงดังรูปที่ 4.9 ความแตกต่างของค่าความสูง (กิโลเมตร)พารามิเตอร์ hmF2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโนแกรมของสถานีเชียงใหม่กับแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือก(BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015) ของแบบจำลอง IRI-2016 ตั้งแต่ มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 ผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าได้จากการเก็บข้อมูลของสถานีเชียงใหม่จะมีค่าขาดหายไปในช่วงปี เนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ในช่วงปี ค.ศ. 2010 ตั้งแต่เดือน เมษายนจนถึงเดือนธันวาคม ในช่วงปี ค.ศ. 2011 เดือนมิถุนายน ในช่วงปี ค.ศ. 2012 เดือนพฤศจิกายน ในช่วงปี ค.ศ. 2014 เดือนตุลาคม

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของพารามิเตอร์ hmF2 แสดงในรูปที่ 4.9 ของตัวเลือก BSE-1979 บ่งชี้ว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่เก็บวัดได้จากสถานีเชียงใหม่ จะมีค่าที่เริ่มสูงขึ้นเกิดขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นและจะถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน 11.00 น.ถึง 13.00 น. และค่อยๆลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุดหรือก่อนช่วงพระอาทิตย์ขึ้น พบว่าค่าที่คาดการณ์จากแบบจำลองจะคาดการณ์ได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลา กลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืน ต่อมาตัวเลือก AMTB-2015 แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวเลือก BSE-1979 เฉพาะเดือนธันวาคมจะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลากลางคืน ค่าของ AMTB-2013 คาดการณ์ค่อนข้างผิดพลาดในช่วงเวลาดังกล่าวและตัวเลือก SHU-2015 แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวเลือก BSE-1979

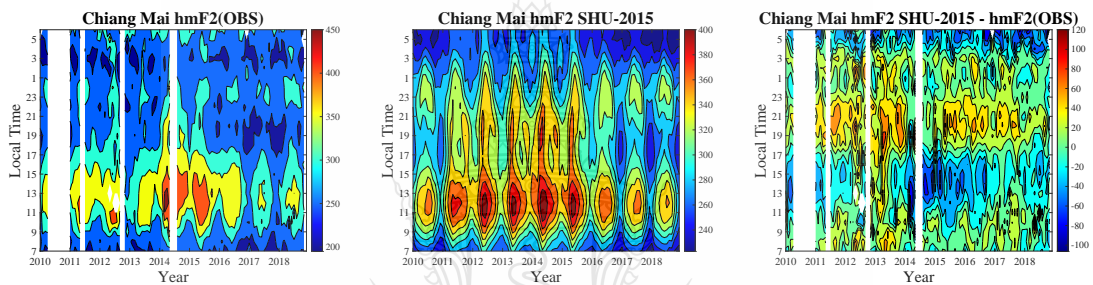


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีเชียงใหม่





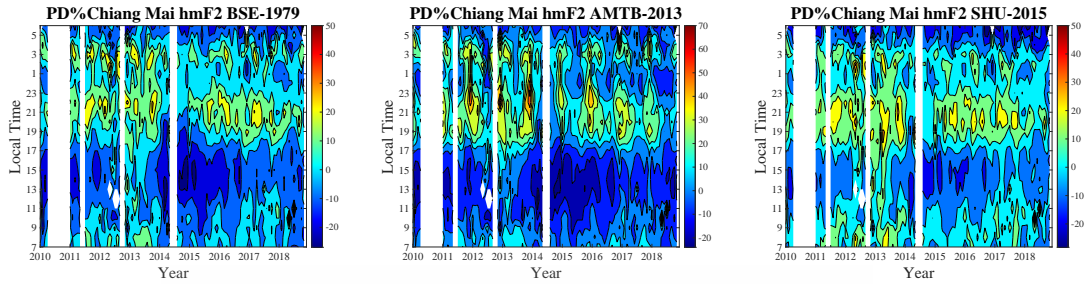
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก AMTB-2013 ของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก SHU-2015 ของสถานีเชียงใหม่

4.1.1.6. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงรูปที่ 4.12 ผลค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ตั้งแต่ มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 พบว่าทั้ง 3 ตัวเลือกจะแสดงแนวโน้มและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันระหว่างการค่าที่สังเกตได้กับแบบจำลอง IRI พบว่าการทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ได้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ที่ทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันและทำนายสูงเกินไปในช่วงเวลากลางคืน ตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือตัวเลือก SHU-2015 ซึ่งจะแสดงผลได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากที่สุด



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก ทั้ง 3 ของสถานีเชียงใหม่

4.1.1.7. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีเชียงใหม่

ผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ(ในปี ค.ศ. 2010) และสูง (ในปี ค.ศ. 2010) พบว่าในปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์สูงจะมีค่าความสูงของ  $hmF2$  ที่สูงกว่าปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำสังเกตเห็นได้ว่า ค่าที่ทำการเก็บวัดได้จากสถานีเชียงใหม่แสดงดังในตารางที่ 4.3 พบว่าในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (06.00-7.00 น.) ค่าที่ได้จากการวัดจะเห็นได้ว่าปีที่มีปฏิกิริยาสูงจะมีค่าของพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่สูงกว่าปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำในทำนองเดียวกันกับแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือกที่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ  $hmF2$  มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์หรือปีที่มีปฏิกิริยาสูงและต่ำที่มีผลต่อขนาดความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงของสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010 และ ปี ค.ศ. 2015

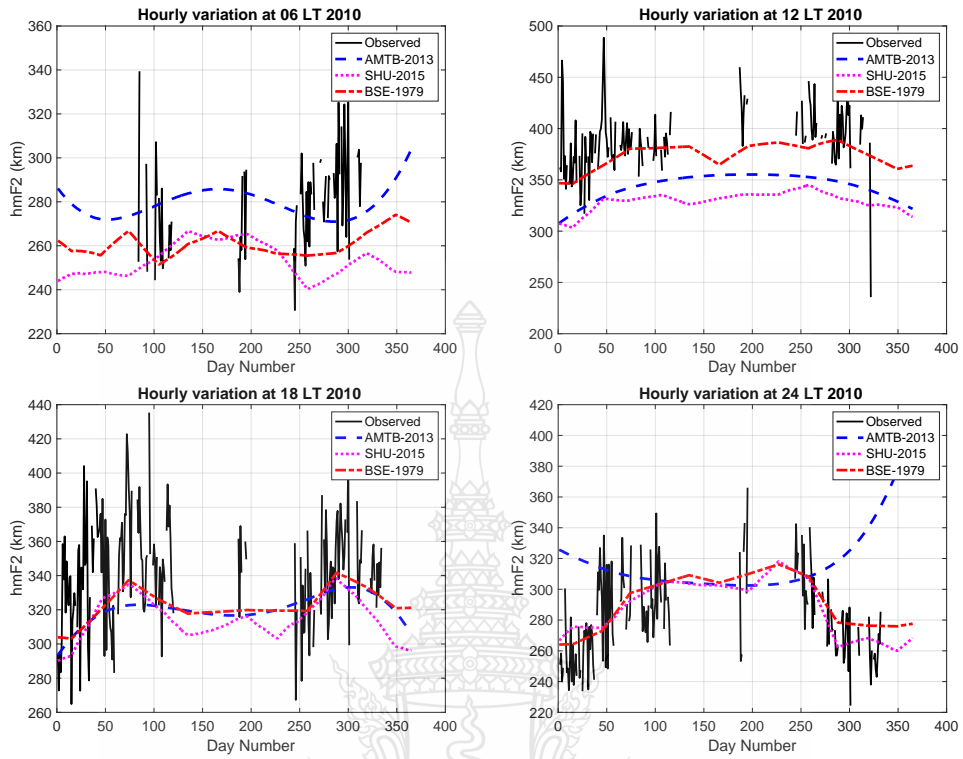
ผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงของสถานีเชียงใหม่																
ปี ค.ศ.	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (06.00-7.00)			เวลาเที่ยงวัน (11.00-13.00)			เวลาพระอาทิตย์ตก (17.00-19.00)			เวลากลางคืน (20.00-05.00)						
	IRI-2016 model			IRI-2016 model			IRI-2016 model			IRI-2016 model						
	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
2010	273	255	274	242	339	332	325	337	296	279	298	288.	297	309	321	307
2015	290	275	294	269	330	354	346	367	303	312	337	332	284	324	347	317

#### 4.1.2 สถานีเชียงใหม่ชุมพร

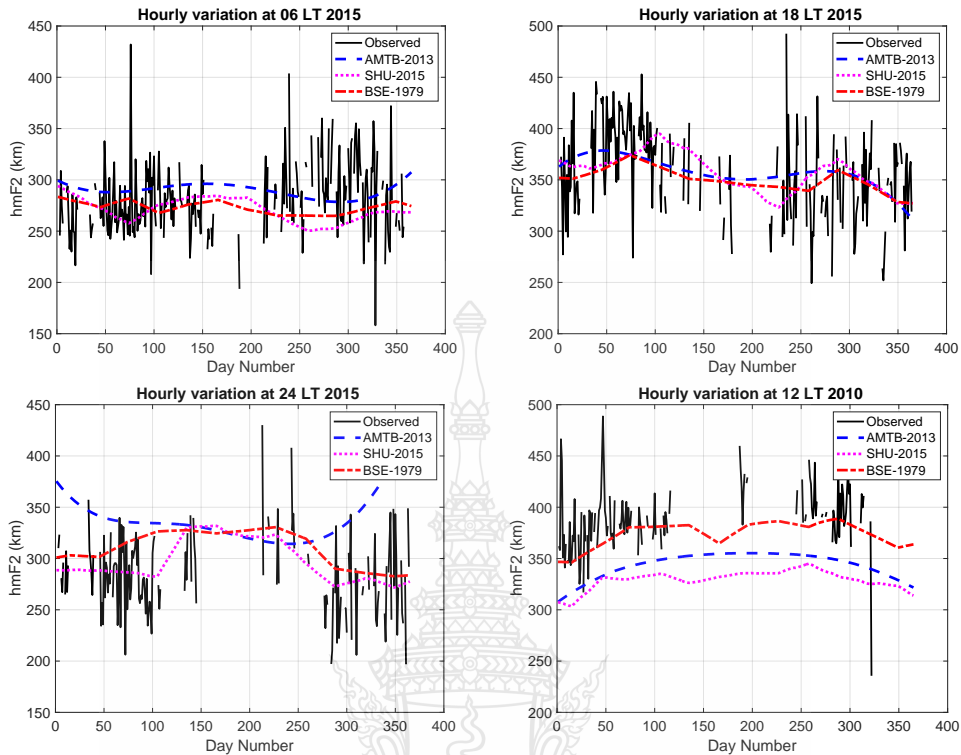
สถานีชุมพรเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่อยู่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก ชื่อย่อสถานีคือ CPN โดยเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่ตั้งอยู่ที่อยู่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ประเทศไทย ที่ตำแหน่งเส้นรุ้ง 10.7 องศาเหนือ เส้นแวง 99.37 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก 3.22 องศาเหนือ โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบชั่วโมง รายวัน รายเดือน รายปี รวมถึงความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

##### 4.1.2.1. เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมง สถานีชุมพร

ได้กำหนดเลือกวันเวลาเช่นเดียวกันกับสถานีเชียงใหม่ซึ่งกำหนดเลือกปีในช่วงปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ (ปี ค.ศ. 2010) และปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์สูง (ปี ค.ศ. 2015) แสดงความผันแปรรายชั่วโมงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่สังเกตได้เปรียบเทียบกับค่าที่คาดการณ์ได้จาก 3 ตัวเลือก BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ของแบบจำลอง IRI-2016 ที่ สถานีชุมพร ประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2010 แสดงดังรูปที่ 4.1 และ ปี ค.ศ. 2015 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ hmF2 ในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น (06LT), เวลาเที่ยงวัน (12LT), พระอาทิตย์ตก (18LT) และเที่ยงคืน (00LT) ตามลำดับ ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมงมีผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกันกับสถานีเชียงใหม่ซึ่งจะทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันและจะทำนายสูงเกินไปในช่วงเวลากลางคืน จะมีค่าที่สูงขึ้นในช่วงเวลา 06.00 น.จนถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงวันหรือประมาณ 11.00 น.ถึง 13.00 น. จะค่อยๆลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นอีกครั้งในเช้าวันถัดไป แสดงดังรูปที่ 4.13 (ปี ค.ศ. 2010) และแสดงในรูปที่ 4.14 (ปี ค.ศ. 2015)



รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมง ของสถานีชุมพรในปี ค.ศ.2010

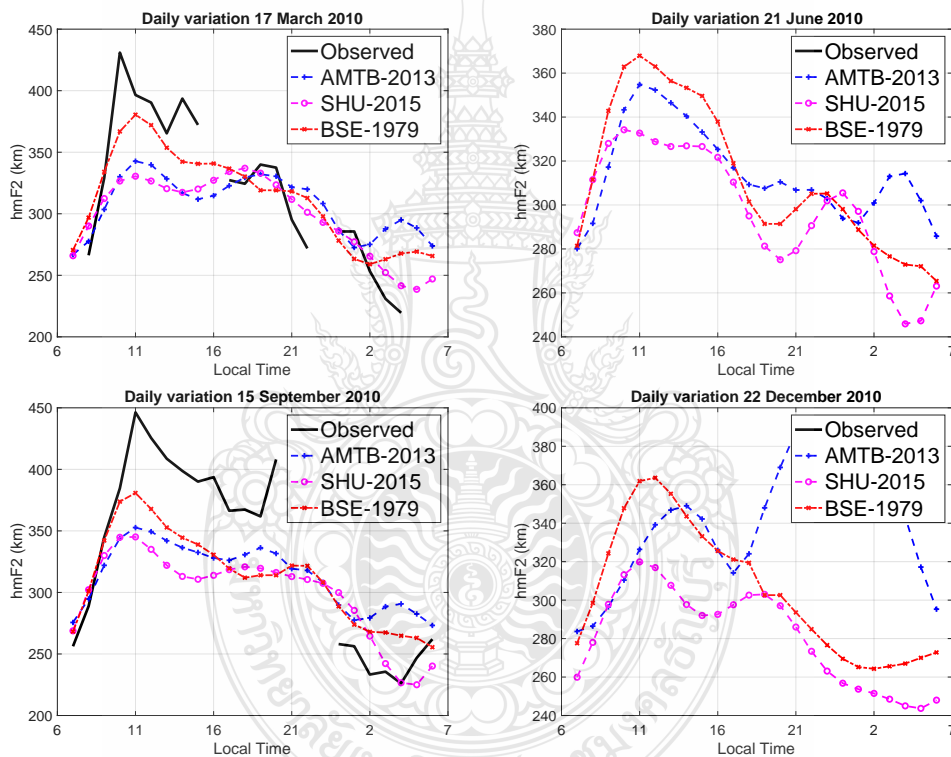


รูปที่ 4.14 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมงของสถานีชุมพรในปี ค.ศ.2015

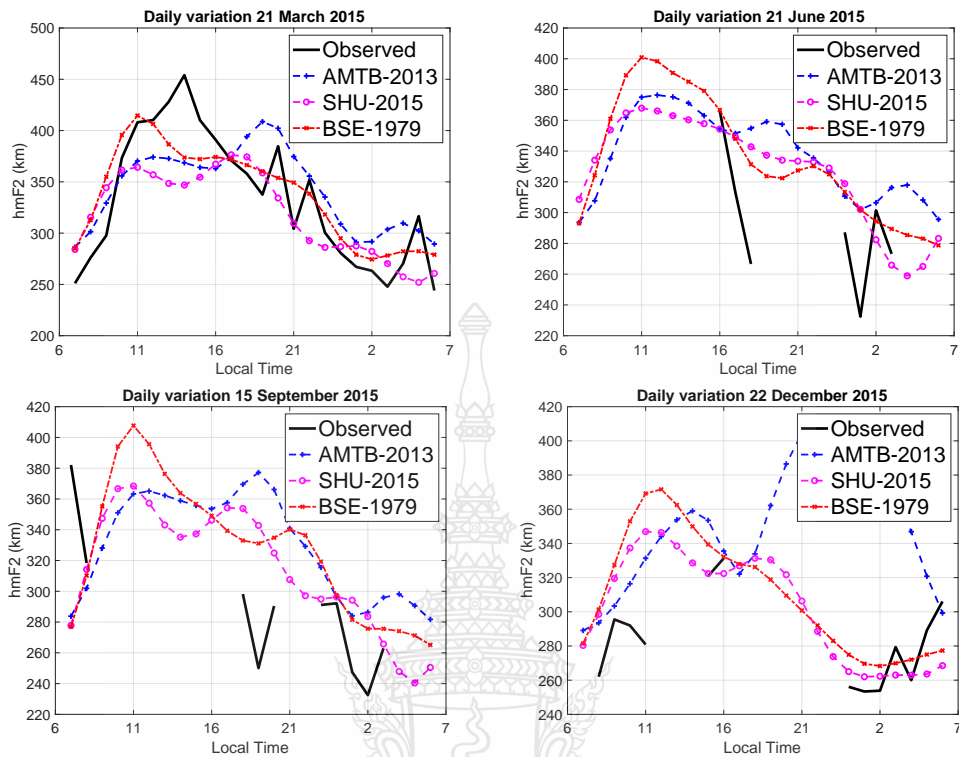
#### 4.1.2.2. เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ $hmF2$ แบบรายวัน สถานีชุมพร

แสดงให้เห็นถึงรูปแบบรายวันของการสังเกตค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ของสถานีชุมพรและการทำนายแบบจำลอง IRI-2016 ในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015 จากแผงซ้ายไปขวาของรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบ  $hmF2$  ในวันที่ 21 มีนาคม 2010, 20 มิถุนายน 2010, 15 กันยายน 2010 และ 22 ธันวาคม 2010 ตามลำดับเช่นเดียวกับปี ค.ศ. 2015  $hmF2$  ที่สังเกตได้จะแสดงเป็นของแข็งสีดำ ตัวเลือก AMTB-2013, SHU-2015 และ BSE-1979 ที่คาดการณ์ไว้จะแสดงด้วยเส้นเครื่องหมายวงสี่เหลี่ยม เส้นประสีม่วงแดง และเส้นประกากบาทสีแดงต่อเนื่องกัน ผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นความผันแปรที่คล้ายคลึงกันระหว่างการสังเกตและการคาดการณ์ว่าค่า  $hmF2$  เพิ่มขึ้นก่อนเวลาพระอาทิตย์ขึ้น 06.00 น ความสูงสูงสุดจะเกิดขึ้นในเวลาเที่ยง 12.00 น. หลังจากนั้นค่า  $hmF2$  จะลดลงจนกระทั่งระดับต่ำสุดเกิดขึ้นประมาณ 05.00 น. ผลลัพธ์ในวันที่ 21 มีนาคม 2010 แสดง 3 ตัวเลือกของแบบจำลองที่

ประเมินค่าต่ำไปในช่วงกลางวันและประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้ในวันอื่น ๆ ผลลัพธ์จะคล้ายกับผลลัพธ์ในวันที่ 21 มีนาคม 2010 แต่ส่วนสูงจริงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ผลลัพธ์ในปี ค.ศ.2015 ดังรูปที่ 4.16 ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นความผันแปรที่คล้ายคลึงกันกับปี ค.ศ.2010 กล่าวคือค่าพารามิเตอร์ hmF2 เพิ่มขึ้นเวลาพระอาทิตย์ขึ้นความสูงสูงสุดจะเกิดขึ้นในเวลาเที่ยงวันหลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ hmF2 จะลดลงจนถึงจุดต่ำสุดก่อนพระอาทิตย์ขึ้น ผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันแสดงทั้ง 3 ตัวเลือกของแบบจำลองที่ประเมินค่าต่ำไปในช่วงกลางวันและประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้



รูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวันของสถานีชุมพรในปี ค.ศ.2010

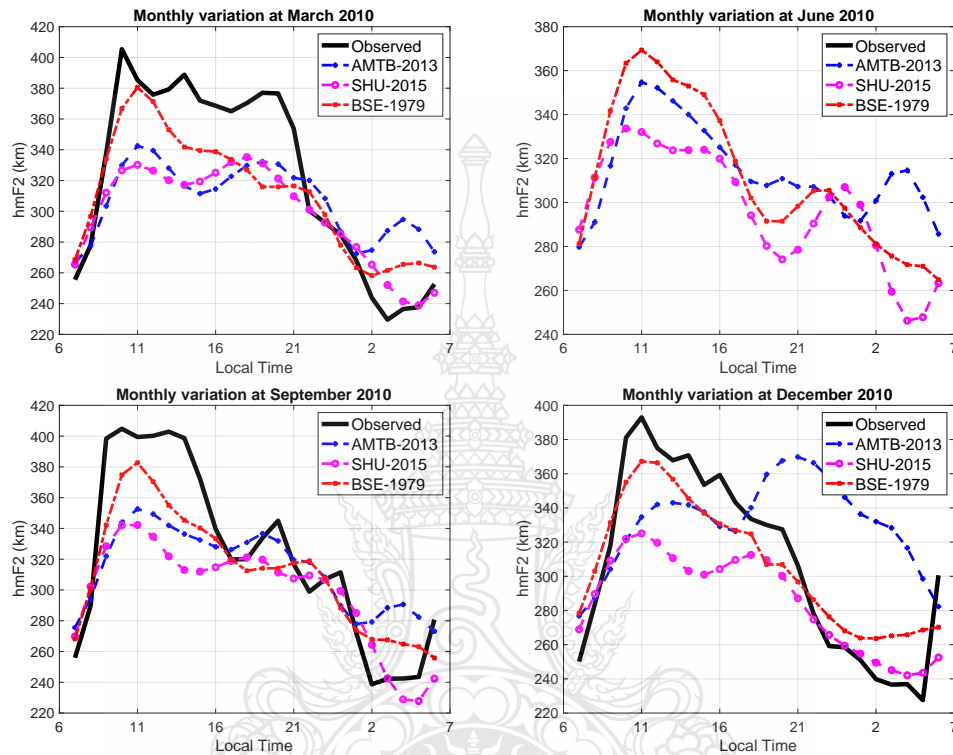


รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  กับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวัน ของสถานีชุมพรในปี ค.ศ.2015

#### 4.1.2.3. เปรียบเทียบผลของค่าพารามิเตอร์ $hmF2$ แบบเดือน สถานีชุมพร

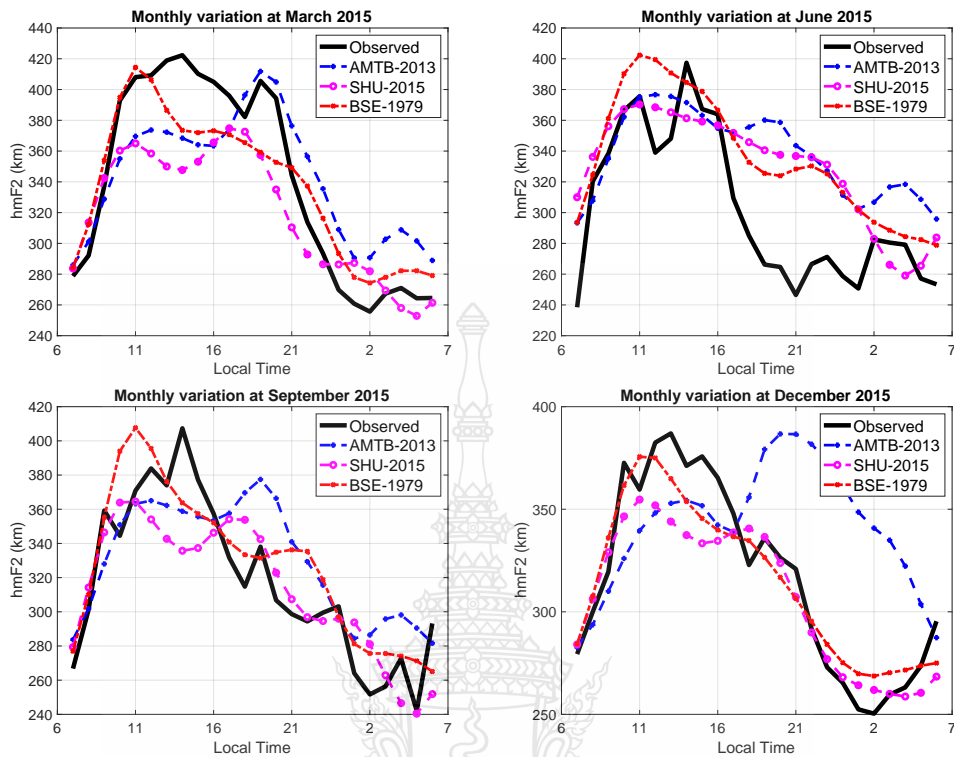
รูปที่ 4.17 ผลลัพธ์จะคล้ายกับผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบรายวัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่คาดการณ์ไว้จะต่ำกว่าในช่วงกลางวันและจะประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืน ค่า  $hmF2$  ในเดือนมีนาคมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 240 ถึง 400 กม. ในขณะที่ในเดือนมิถุนายนจะเปลี่ยนระหว่าง 280 กม. ถึง 360 กม. ระดับ  $hmF2$  ในเดือนกันยายน ปรับเปลี่ยนในช่วง 260 กม. ถึง 400 กม. ในเดือนธันวาคม ข้อมูลค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 240 กม. ถึง 300 กม. รูปที่ 4.16 โดยที่ค่า  $hmF2$  ที่คาดการณ์ไว้จะคาดการณ์ผิดพลาดในช่วงกลางวันและจะประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืน ค่า  $hmF2$  ในเดือนมีนาคมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 250 ถึง 430 กม. ในขณะที่ในเดือนมิถุนายนจะเปลี่ยนระหว่าง 260 กม. ถึง 440 กม. ระดับ  $hmF2$  ในเดือนกันยายนปรับเปลี่ยนในช่วง 240 กม. ถึง 400 กม.

ในเดือนธันวาคม ข้อมูล  $hmF2$  จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 245 กม. ถึง 360 กม. อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับทั้ง 3 ตัวเลือก



รูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายเดือนของสถานีชุมพรสถานีเชียงใหม่ในปี ค.ศ. 2010

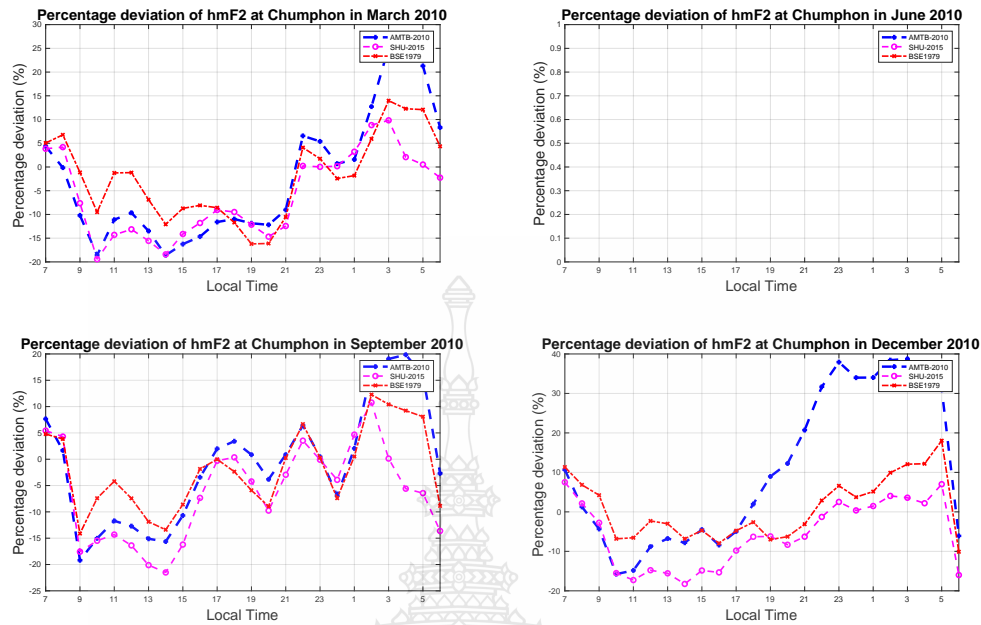




รูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายเดือนของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2015

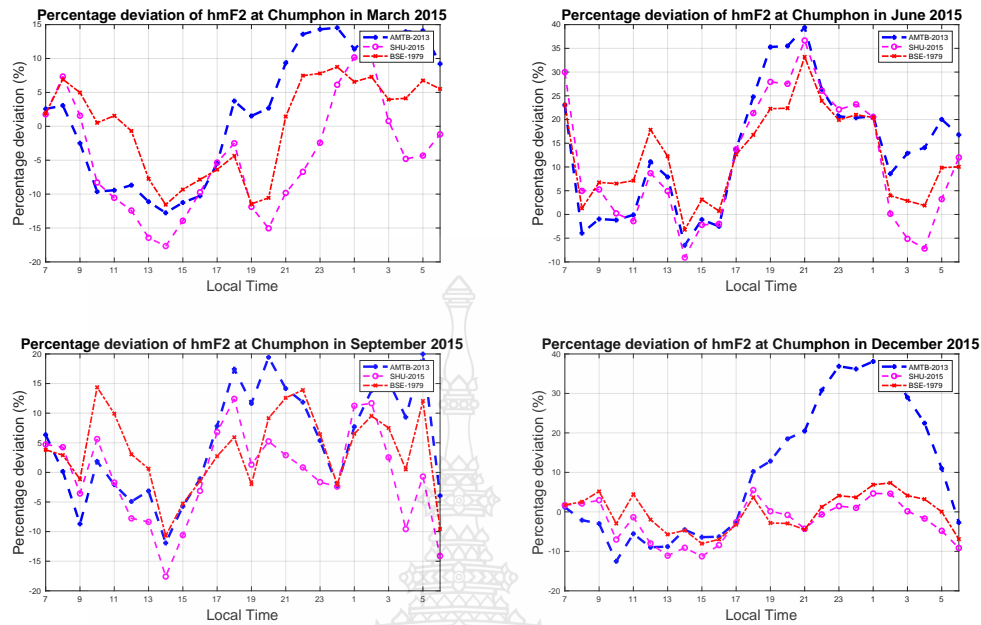
#### 4.1.2.4. เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $hmF2$ แบบรายฤดูกาล สถานีชุมพร

ได้กำหนดเลือกวันเวลาเช่นเดียวกันกับสถานีเชียงใหม่ โดยแบ่งออกเป็นฤดูตามตำแหน่งของพระอาทิตย์เป็นหลักออกมาเป็น 4 ฤดูได้แก่ March Equinox (มีนาคม เมษายน), June Solstice (พฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม), September Equinox (กันยายน ตุลาคม) และ December Solstice (พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์) โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  แสดงดังรูปที่ 4.18 และ แสดงดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายฤดูกาลของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2010

จากรูปที่ 4.19 ผลลัพธ์ในเดือนมีนาคม กันยายน และธันวาคมในปี ค.ศ. 2010 บ่งชี้ว่า %PD ตัวเลือกของ BSE-1979, AMTB-2015 และ SHU-2015 มีค่าอยู่ที่ -20% ในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลากลางคืนทั้ง 3 ตัวเลือกจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 10% กล่าวคือ ทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืน จากรูปที่ 4.20 ผลลัพธ์ในเดือนมีนาคมปี ค.ศ. 2015 บ่งชี้ว่า ตัวเลือกทั้ง 3 ตัวเลือกมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันทั้งในเวลากลางวันและในช่วงเวลากลางคืน กล่าวคือ จะคาดการณ์ต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืนค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ -20% ถึง 10% เช่นเดียวกับเดือน มิถุนายน และกันยายน เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ  $\pm 15\%$  ในเดือนธันวาคมจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง -10% ถึง 8% เฉพาะ BSE-1979 และ SHU-2015 ซึ่ง AMTB-2015 จะคาดการณ์ค่อนข้างผิดพลาดในช่วงเวลากลางคืน เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ 40%



รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายฤดูกาลของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2015

แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ของสถานีชุมพร ตั้งแต่เวลา 06.00 น.จนถึงเวลา 05.00 น. แบบรายฤดูกาลในช่วงปี ค.ศ. 2010 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.4 และ ปี ค.ศ. 2015 แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่ได้จากการเก็บข้อมูลที่สถานีชุมพร ผลลัพธ์ในตารางที่ 4.4 และ ตารางที่ 4.5 จะแสดงค่าของพารามิเตอร์  $hmF2$  จะมีค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงแต่ละฤดูกาลเทียบกับค่าเฉลี่ยของแต่ละแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก พบว่ามีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันในแต่ละรายชั่วโมงคือ  $hmF2$  ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือกจะทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันหรือประมาณ 6.00 น.จนถึง 17.00 หรือก่อนช่วงพระอาทิตย์ตกและทำนายสูงไปในช่วงเวลากลางคืน สังเกตให้เห็นว่าในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015 ในเวลากลางวันช่วงฤดูกาล June Solstice จะมีค่าที่สูงกว่าในฤดูกาลอื่น ๆ

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีชุมพร  
ในปี ค.ศ. 2010

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีชุมพรในปี ค.ศ.2010																
ราย ชั่วโมง	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)				June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)				September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)				December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)			
	Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model		
		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
06.00	375	371	339	326	415	364	352	328	400	371	349	333	NaN	364	340	352
07.00	382	353	328	320	445	356	346	325	402	355	342	321	NaN	355	346	344
08.00	385	342	317	316	416	353	340	326	398	346	337	314	NaN	344	347	338
09.00	374	339	311	319	405	349	333	325	378	341	333	313	NaN	334	341	332
10.00	369	339	314	325	358	337	325	321	342	333	328	316	NaN	327	327	321
11.00	363	334	322	332	358	319	317	310	324	322	326	319	317	322	317	311
12.00	367	327	329	334	346	302	310	295	319	314	331	319	301	321	328	308
13.00	378	315	332	330	317	291	308	281	329	312	337	316	300	304	351	310
14.00	380	315	331	321	282	291	311	275	338	312	332	311	297	304	369	314
15.00	352	314	322	310	281	298	307	279	315	317	320	307	289	294	383	315
16.00	310	309	320	300	284	305	307	291	299	317	318	305	258	285	383	312
17.00	295	295	309	292	309	306	303	302	307	305	309	303	260	276	379	311
18.00	289	277	287	285	308	298	294	306	312	287	290	297	NaN	269	376	302
19.00	270	263	273	277	266	288	292	298	276	274	278	284	NaN	265	371	287
20.00	247	258	275	265	230	280	301	280	244	268	280	265	NaN	264	366	275
21.00	234	261	288	252	256	275	313	259	246	268	289	244	NaN	266	356	271
22.00	237	265	295	241	NaN	271	314	247	247	265	291	229	NaN	267	337	270
23.00	240	266	288	239	NaN	271	302	248	238	263	283	228	NaN	270	313	263
24.00	268	268	297	268	257	273	302	264	256	271	293	260	NaN	262	374	277
1.00	255	268	267	267	304	281	280	288	255	268	276	271	NaN	278	282	277
2.00	283	294	278	291	334	311	291	311	301	301	295	302	NaN	300	287	307
3.00	345	331	303	314	402	343	317	328	388	343	322	328	NaN	326	298	341
4.00	406	364	330	327	413	364	343	334	408	375	344	342	NaN	350	313	353
5.00	385	378	342	331	425	369	355	332	408	383	353	342	NaN	363	328	359

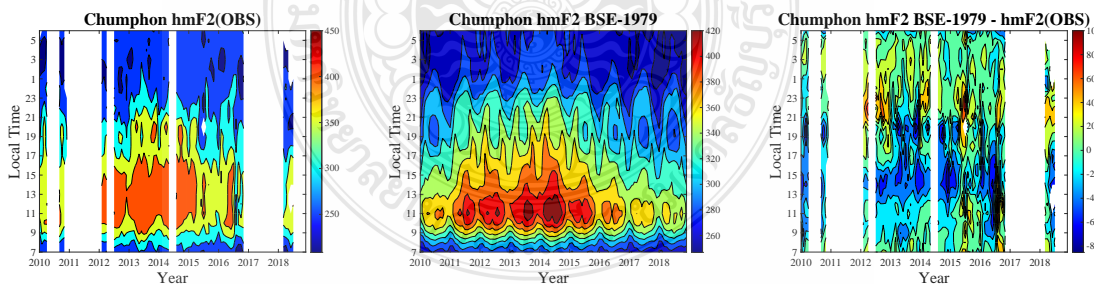
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีชุมพร  
ในปี ค.ศ. 2015

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีชุมพรในปี ค.ศ.2015																
ราย ชั่วโมง	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)				June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)				September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)				December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)			
	Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model		
		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
06.00	375	371	339	326	415	364	352	328	400	371	349	333	NaN	364	340	352
07.00	382	353	328	320	445	356	346	325	402	355	342	321	NaN	355	346	344
08.00	385	342	317	316	416	353	340	326	398	346	337	314	NaN	344	347	338
09.00	374	339	311	319	405	349	333	325	378	341	333	313	NaN	334	341	332
10.00	369	339	314	325	358	337	325	321	342	333	328	316	NaN	327	327	321
11.00	363	334	322	332	358	319	317	310	324	322	326	319	317	322	317	311
12.00	367	327	329	334	346	302	310	295	319	314	331	319	301	321	328	308
13.00	378	315	332	330	317	291	308	281	329	312	337	316	300	304	351	310
14.00	380	315	331	321	282	291	311	275	338	312	332	311	297	304	369	314
15.00	352	314	322	310	281	298	307	279	315	317	320	307	289	294	383	315
16.00	310	309	320	300	284	305	307	291	299	317	318	305	258	285	383	312
17.00	295	295	309	292	309	306	303	302	307	305	309	303	260	276	379	311
18.00	289	277	287	285	308	298	294	306	312	287	290	297	NaN	269	376	302
19.00	270	263	273	277	266	288	292	298	276	274	278	284	NaN	265	371	287
20.00	247	258	275	265	230	280	301	280	244	268	280	265	NaN	264	366	275
21.00	234	261	288	252	256	275	313	259	246	268	289	244	NaN	266	356	271
22.00	237	265	295	241	NaN	271	314	247	247	265	291	229	NaN	267	337	270
23.00	240	266	288	239	NaN	271	302	248	238	263	283	228	NaN	270	313	263
24.00	268	268	297	268	257	273	302	264	256	271	293	260	NaN	262	374	277
1.00	255	268	267	267	304	281	280	288	255	268	276	271	NaN	278	282	277
2.00	283	294	278	291	334	311	291	311	301	301	295	302	NaN	300	287	307
3.00	345	331	303	314	402	343	317	328	388	343	322	328	NaN	326	298	341
4.00	406	364	330	327	413	364	343	334	408	375	344	342	NaN	350	313	353
5.00	385	378	342	331	425	369	355	332	408	383	353	342	NaN	363	328	359

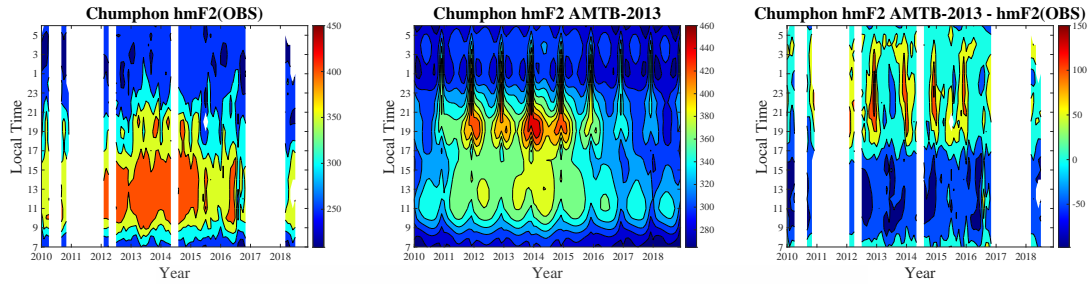
4.1.2.5. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีชุมพร

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงดังรูปที่ 4.21 ความแตกต่างของค่าความสูง (กิโลเมตร)พารามิเตอร์  $hmF2$  ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโนแกรมของสถานีชุมพรกับแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือก(BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015) ของแบบจำลอง IRI-2016 ตั้งแต่ มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 ผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าได้จากการเก็บข้อมูลของสถานีชุมพรจะมีค่าขาดหายไปบางปีเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ในช่วงปี ค.ศ. 2010 เดือน เมษายน พฤษภาคม และปี ค.ศ. 2011 จนถึงต้นปี ค.ศ. 2012 และช่วงปี ค.ศ. 2014 เดือนเมษายน และช่วงปลายปี ค.ศ. 2016 จนถึงปี ค.ศ. 2018

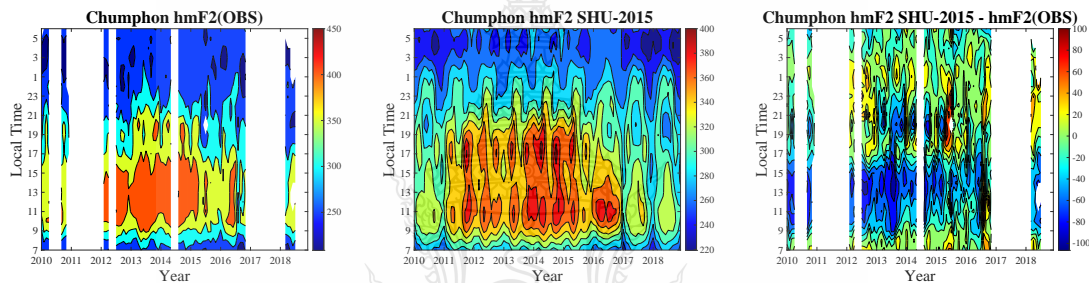
เมื่อพิจารณาความแตกต่างของพารามิเตอร์  $hmF2$  แสดงในรูปที่ 4.21 ของตัวเลือก BSE-1979 บ่งชี้ว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่เก็บวัดได้จากสถานีชุมพร จะมีค่าที่เริ่มสูงขึ้นเกิดขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น และจะถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน 11.00 น. ถึง 13.00 น. และค่อยๆลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุดหรือก่อนช่วงพระอาทิตย์ขึ้น พบว่าค่าที่คาดการณ์จากแบบจำลองจะคาดการณ์ได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืน ต่อมาตัวเลือก AMTB-2015 แสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวเลือก BSE-1979 เฉพาะเดือนธันวาคมจะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลากลางคืนค่าของ AMTB-2013 คาดการณ์ค่อนข้างผิดพลาดในช่วงเวลาดังกล่าวและตัวเลือก SHU-2015 แสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวเลือก BSE-1979



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีชุมพร



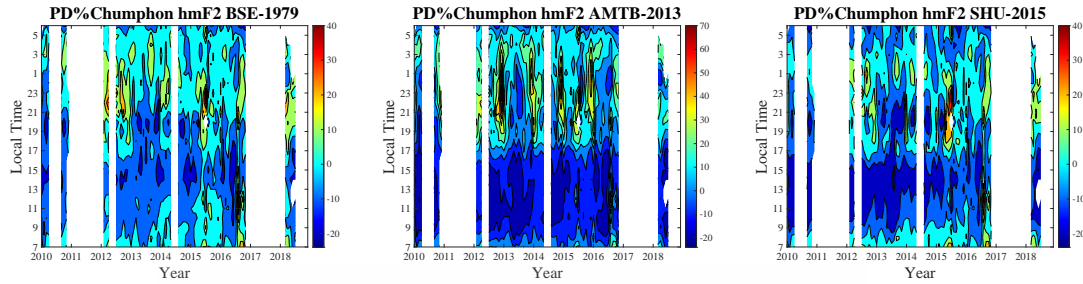
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก AMTB-2013 ของสถานีชุมพร



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก SHU-2015 ของสถานีชุมพร

4.1.2.6. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีชุมพร

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงผลค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ตั้งแต่มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 พบว่าทั้ง 3 ตัวเลือกจะแสดงแนวโน้มและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันระหว่างการค่าที่สังเกตได้กับแบบจำลอง IRI พบว่าการทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ได้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ที่ทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันและทำนายสูงไปในช่วงเวลากลางคืน ตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือตัวเลือก BSE-1979 และ SHU-2015 ซึ่งจะแสดงผลได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากที่สุด



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก ทั้ง 3 ของสถานีชุมพร

4.1.2.7. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีชุมพร

ผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ(ในปี ค.ศ. 2010) และสูง (ในปี ค.ศ. 2010) พบว่าในปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์สูงจะมีค่าความสูงของ  $hmF2$  ที่สูงกว่าปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำสังเกตเห็นได้ว่า ค่าที่ทำการเก็บวัดได้จากสถานีเชียงใหม่แสดงดังในตารางที่ 4.6 พบว่าในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (06.00-7.00 น.) ค่าที่ได้จากการวัดจะเห็นได้ว่าปีที่มีปฏิริยาสูงจะมีค่าของพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่สูงกว่าปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำในทำนองเดียวกันกับแบบจำลอง ทั้ง 3 ตัวเลือกที่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ  $hmF2$  มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์หรือปีที่มีปฏิริยาสูงและต่ำที่มีผลต่อขนาดความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงของสถานีชุมพรในปี ค.ศ. 2010 และ ปี ค.ศ. 2015

ผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงของสถานีชุมพร																
ปี ค.ศ.	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (06.00-7.00)			เวลาเที่ยงวัน (11.00-13.00)			เวลาพระอาทิตย์ตก (17.00-19.00)			เวลากลางคืน (20.00-05.00)						
	IRI-2016 model			IRI-2016 model			IRI-2016 model			IRI-2016 model						
	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	Observe	BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
2010	279	261	279	253	390	375	344	330	343	323	320	315	282	293	318	289
2015	282	273	290	270	385	403	363	367	357	351	358	357	284	311	339	298

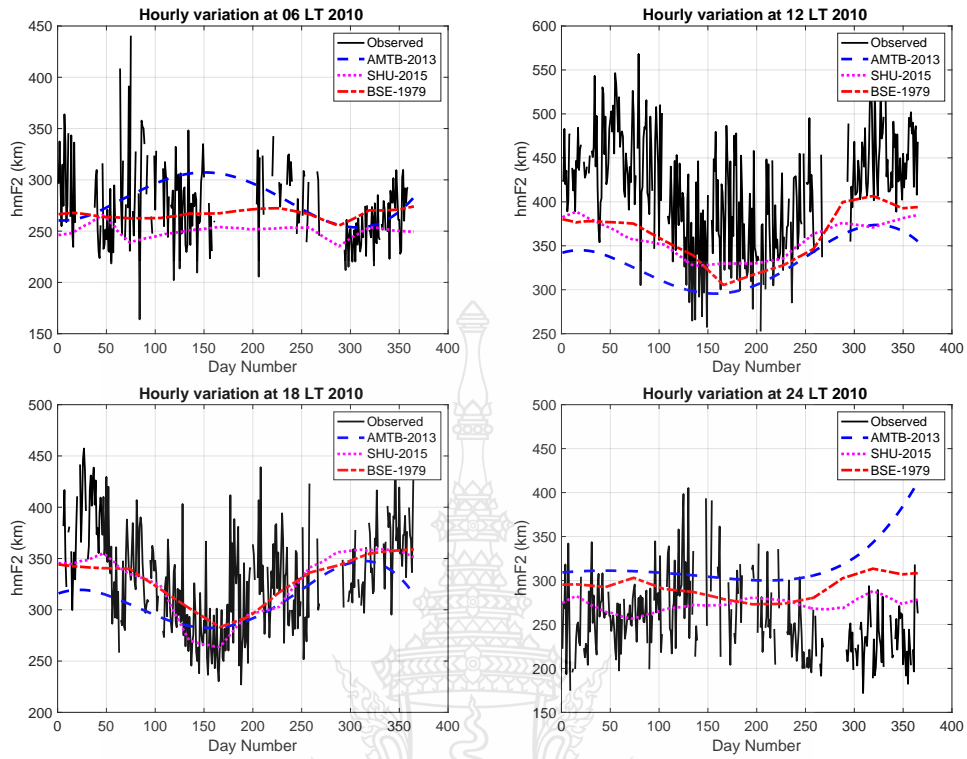


#### 4.1.3 สถานีเชียงใหม่โกโตตาทั้ง

สถานีโกโตตาทั้งเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่อยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กประมาณ 10-15 องศา ชื่อย่อสถานีคือ KTT โดยเป็นสถานีไอโอโนซอนด์ที่ตั้งอยู่ที่สถานีสถาบันการบินและอวกาศแห่งชาติ National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN) โกโตตาทั้ง ประเทศอินโดนีเซีย ที่ตำแหน่ง เส้นรุ้ง -0.20 องศาเหนือ เส้นแวง 100.32 องศาตะวันออก และตำแหน่งเส้นรุ้งแม่เหล็ก -10.1 องศาเหนือ โดยทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเป็นแบบชั่วโมง รายวัน รายเดือน รายปี รวมถึงความแตกต่างระหว่าง ปีที่มีปฏิกริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงเปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก ได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 แสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

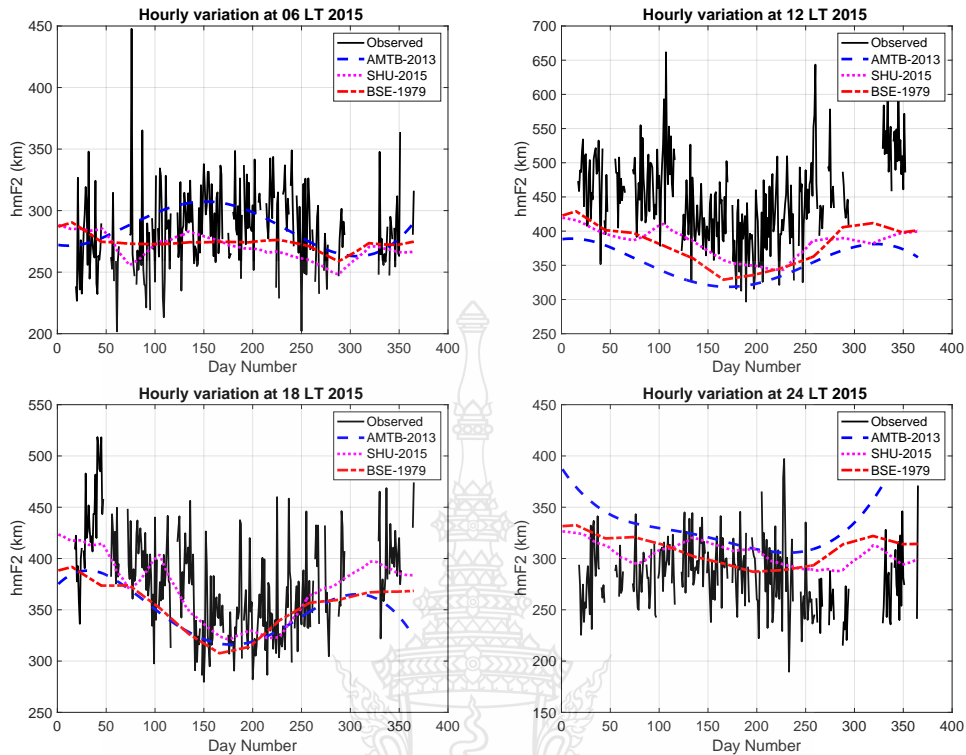
##### 4.1.3.1. เปรียบเทียบผลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมง สถานีโกโตตาทั้ง

ได้กำหนดเลือกวันเวลาเช่นเดียวกันกับสถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพรซึ่งกำหนดเลือกปีในช่วงปี ที่มีปฏิกริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ (ปี ค.ศ. 2010) และปีที่มีปฏิกริยาจากดวงอาทิตย์สูง (ปี ค.ศ. 2015) แสดงความผันแปรรายชั่วโมงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่สังเกตได้เปรียบเทียบกับค่าที่คาดการณ์ ได้จาก 3 ตัวเลือก BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ของแบบจำลอง IRI-2016 ที่สถานีโกโตตาทั้ง ในปี ค.ศ. 2010 แสดงดังรูปที่ 4.45 และ ปี ค.ศ. 2015 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ hmF2 ในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น (06LT), เวลาเที่ยงวัน (12LT), พระอาทิตย์ตก (18LT) และเที่ยงคืน (00LT) ตามลำดับ ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายชั่วโมงมีผลลัพธ์ที่คล้ายคลึงกัน กับสถานีเชียงใหม่และสถานีโกโตตาทั้งซึ่งจะทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันและจะทำนายสูงเกินไป ในช่วงเวลากลางคืน จะมีค่าที่สูงขึ้นในช่วงเวลา 06.00 น.จนถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาเที่ยงวันหรือ ประมาณ 11.00 น.ถึง 13.00 น. จะค่อย ๆ ลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นอีกครั้งใน เช้าวันถัดไป แสดงในรูปที่ 4.25 (ปี ค.ศ. 2010) และแสดงในรูปที่ 4.26 (ปี ค.ศ. 2015)



รูปที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมงของสถานีโกโตตางในปี ค.ศ. 2010



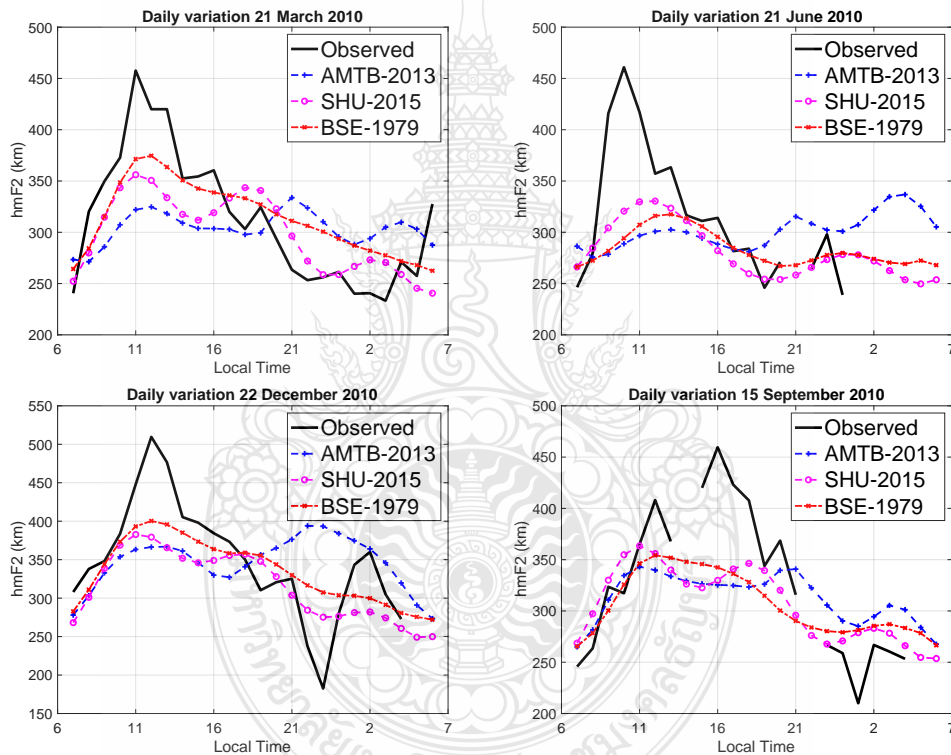


รูปที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายชั่วโมงของสถานีโกโตตาบังในปี ค.ศ. 2015

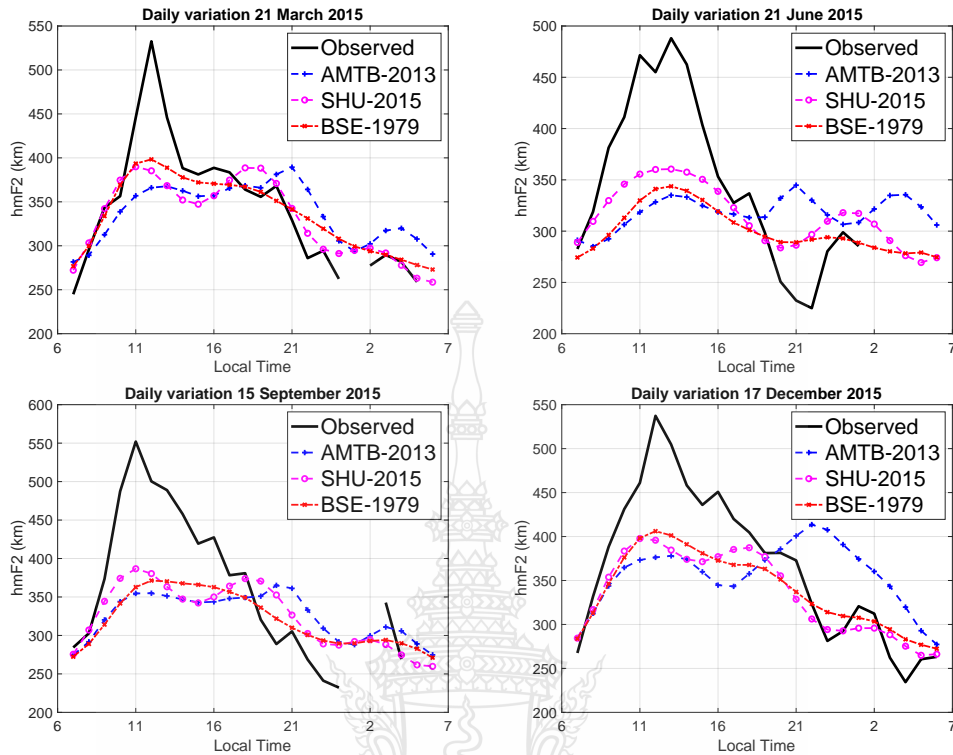
#### 4.1.3.2. เปรียบเทียบของค่าพารามิเตอร์ $hmF2$ แบบรายวัน สถานีโกโตตาบัง

แสดงให้เห็นถึงรูปแบบรายวันของการสังเกตค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ได้จากสถานีโกโตตาบังและการทำนายแบบจำลอง IRI-2016 ในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015 จากแผงซ้ายไปขวาของรูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบ  $hmF2$  ในวันที่ 21 มีนาคม 2010, 20 มิถุนายน 2010, 15 กันยายน 2010 และ 22 ธันวาคม 2010 ตามลำดับ  $hmF2$  ที่สังเกตได้จะแสดงเป็นของแข็งสีดำ ตัวเลือก AMTB-2013, SHU-2015 และ BSE-1979 ที่ คาดการณ์ไว้จะแสดงด้วยเส้นเครื่องหมายบวกสีน้ำเงิน เส้นประสีม่วงแดง และเส้นประ กากบาทสีแดงต่อเนื่องกัน ผลลัพธ์ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นความผันแปรที่คล้ายคลึงกันระหว่างการสังเกตและการคาดการณ์ว่าค่า  $hmF2$  เพิ่มขึ้นก่อนเวลาพระอาทิตย์ขึ้น 06.00 น ความสูงสูงสุดจะเกิดขึ้นในเวลาเที่ยง 12.00 น. หลังจากนั้นค่า  $hmF2$  จะลดลงจนกระทั่งระดับต่ำสุดเกิดขึ้นประมาณ 05.00 น. ผลลัพธ์ในวันที่ 21 มีนาคม 2010 แสดง 3 ตัวเลือกของแบบจำลองที่ประเมินค่าต่ำไปในช่วงกลางวันและ

ประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้ ในวันอื่น ๆ ผลลัพธ์จะคล้ายกับผลลัพธ์ในวันที่ 21 มีนาคม 2010 แต่ส่วนสูงจริงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย ผลลัพธ์ในปี ค.ศ.2015 ดังรูปที่ 4.28 ส่วนใหญ่แสดงให้เห็นความผันแปรที่คล้ายคลึงกันกับปี ค.ศ.2010 กล่าวคือค่าพารามิเตอร์ hmF2 เพิ่มขึ้นเวลาพระอาทิตย์ขึ้นความสูงสูงสุดจะเกิดขึ้นในเวลาเที่ยงวันหลังจากนั้นค่าพารามิเตอร์ hmF2 จะลดลงจนถึงจุดต่ำสุดก่อนพระอาทิตย์ขึ้น ผลลัพธ์ส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันแสดงทั้ง 3 ตัวเลือกของแบบจำลองที่ประเมินค่าต่ำไปในช่วงกลางวันและประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่สังเกตได้



รูปที่ 4.27 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวันของสถานีโกโตตางังในปี ค.ศ. 2010

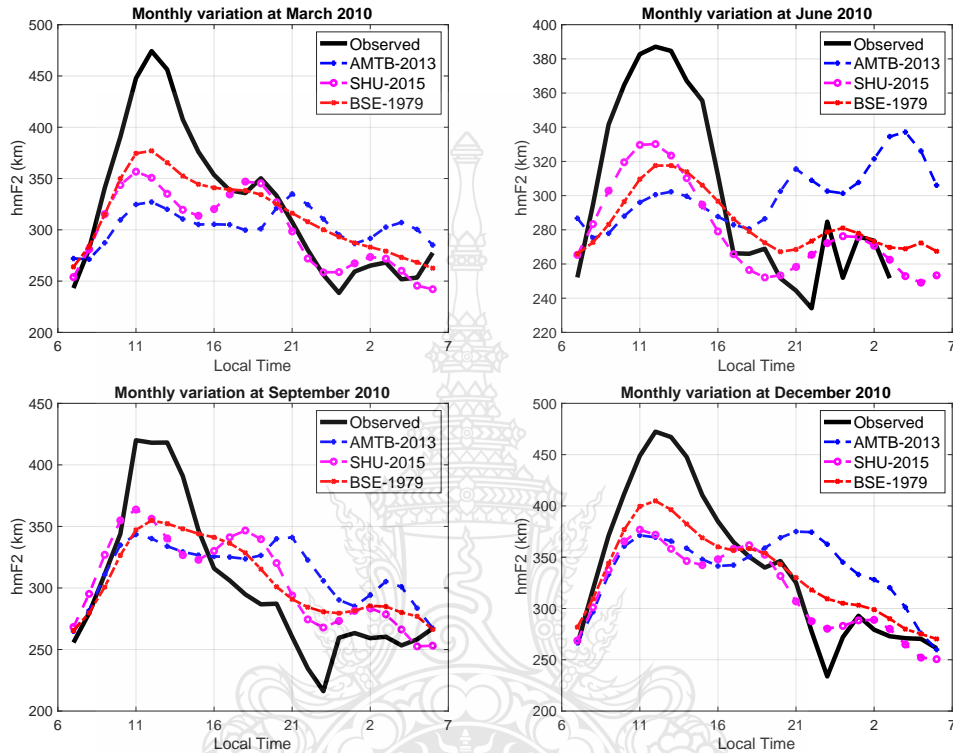


รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายวันของสถานีโกโตตาบังในปี ค.ศ. 2015

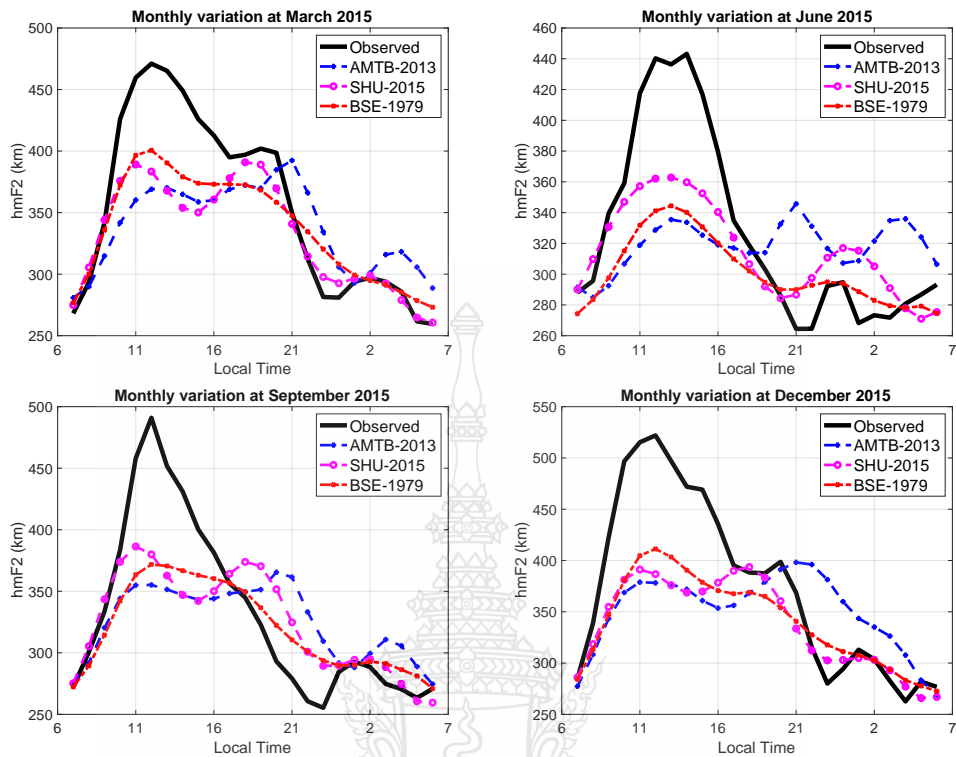
#### 4.1.3.3. เปรียบเทียบผลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แบบเดือน สถานีโกโตตาบัง

รูปที่ 4.29 ผลลัพธ์จะคล้ายกับผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบรายวัน โดยที่ค่าพารามิเตอร์ hmF2 ที่คาดการณ์ไว้จะต่ำกว่าในช่วงกลางวันและจะประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืน ค่า hmF2 ในเดือนมีนาคมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 250 ถึง 450 กม. ในขณะที่ในเดือนมิถุนายนจะเปลี่ยนระหว่าง 260 กม. ถึง 380 กม. ระดับ hmF2 ในเดือนกันยายน ปรับเปลี่ยนในช่วง 230 กม. ถึง 430 กม. ในเดือนธันวาคม ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ hmF2 จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 230 กม. ถึง 470 กม. รูปที่ 4.30 โดยที่ค่า hmF2 ที่คาดการณ์ไว้จะคาดการณ์ผิดพลาดในช่วงกลางวันและจะประเมินค่าสูงไปในตอนกลางคืน ค่า hmF2 ในเดือนมีนาคมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 250 ถึง 450 กม. ในขณะที่ในเดือนมิถุนายนจะเปลี่ยนระหว่าง 260 กม. ถึง 440 กม. ระดับ hmF2 ในเดือนกันยายน ปรับเปลี่ยนในช่วง 240 กม. ถึง 440 กม. ในเดือน

ธันวาคม ข้อมูล  $hmF2$  จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 250 กม. ถึง 530 กม. อย่างไรก็ตามส่วนใหญ่จะแสดงแนวโน้มที่คล้ายคลึงกันกับทั้ง 3 ตัวเลือก



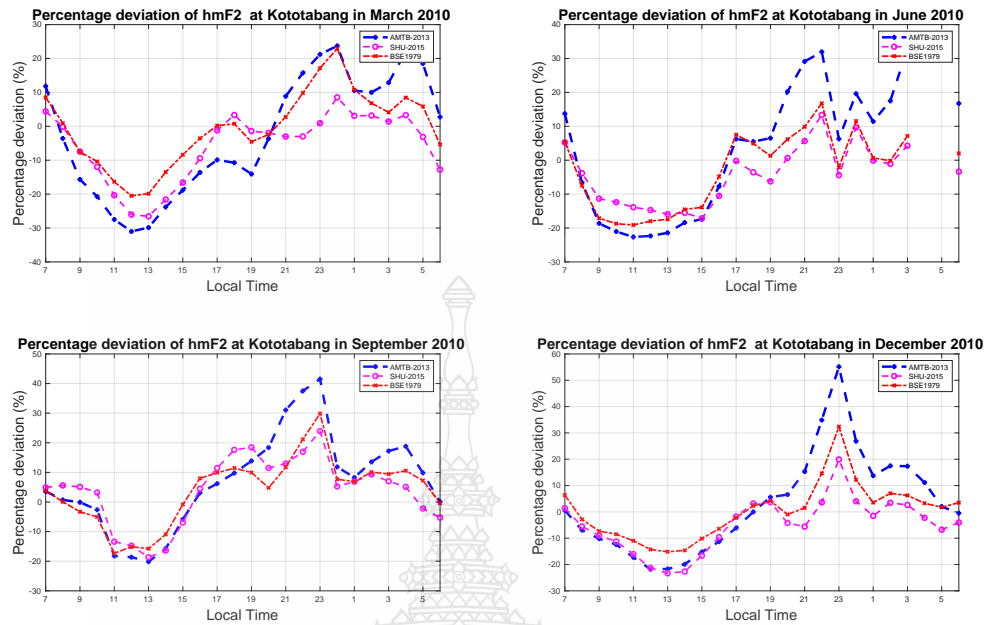
รูปที่ 4.29 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายเดือนของสถานีโกโตตางังในปี ค.ศ. 2010



รูปที่ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายเดือนของสถานีโกโตตาทั้งในปี ค.ศ. 2015

#### 4.1.3.4. เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ hmF2 แบบรายฤดูกาล สถานีโกโตตาทั้ง

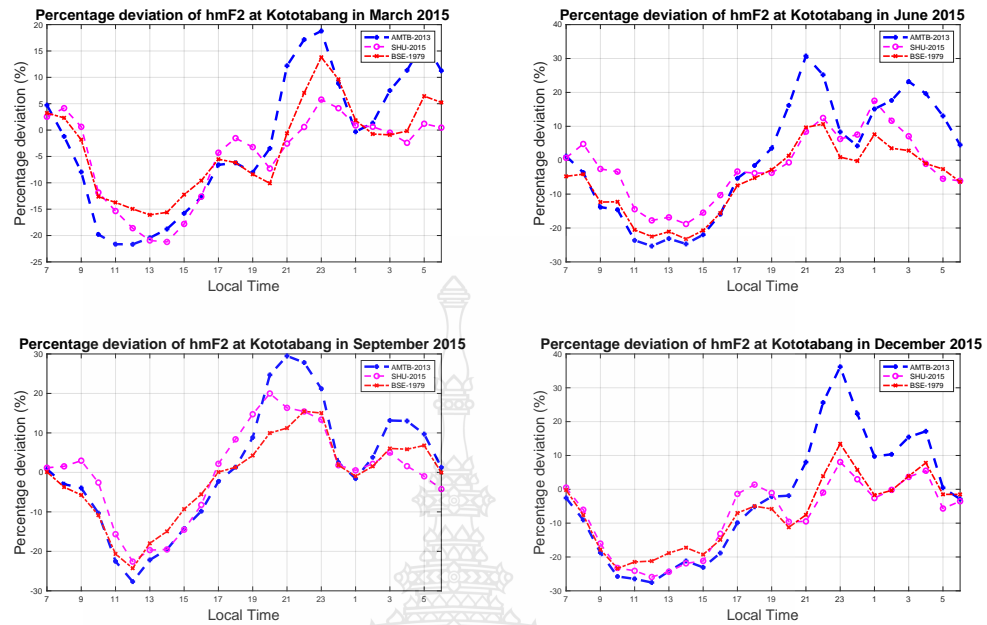
ได้กำหนดเลือกวันเวลาเช่นเดียวกันกับสถานีเชียงใหม่และสถานีชุมพร โดยแบ่งออกเป็นฤดูตามตำแหน่งของพระอาทิตย์เป็นหลักออกมาเป็น 4 ฤดูได้แก่ March Equinox (มีนาคม เมษายน), June Solstice (พฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม), September Equinox (กันยายน ตุลาคม) และ December Solstice (พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์) โดยแสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ hmF2 แสดงดังรูปที่ 4.31 และ แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายฤดูกาลของสถานีโกโตตาบังในปี ค.ศ. 2010

จากรูปที่ 4.31 ผลลัพธ์ในเดือนมีนาคม กันยายน และธันวาคมในปี ค.ศ. 2010 บ่งชี้ว่า %PD ตัวเลือกของ BSE-1979, AMTB-2015 และ SHU-2015 มีค่าอยู่ที่ -30% ในช่วงเวลากลางวัน ในช่วงเวลากลางคืนทั้ง 3 ตัวเลือกจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ 30% กล่าวคือ ทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืน จากรูปที่ 4.32 ผลลัพธ์ในเดือนมีนาคมปี ค.ศ. 2015 บ่งชี้ว่า ตัวเลือกทั้ง 3 ตัวเลือกมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันทั้งในเวลากลางวันและในช่วงเวลากลางคืน กล่าวคือ จะคาดการณ์ต่ำไปในช่วงเวลากลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืนค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ -20% ถึง 20% เช่นเดียวกับเดือน มิถุนายน และกันยายน เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ  $\pm 30\%$  ในเดือนธันวาคมว่าจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง -30% ถึง 10% เฉพาะ BSE-1979 และ SHU-2015 ซึ่ง AMTB-2015 จะคาดการณ์ค่อนข้างผิดพลาดในช่วงเวลากลางคืน เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงที่ประมาณ 40%





รูปที่ 4.32 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  แบบรายฤดูกาลของสถานีโกโตตาบังในปี ค.ศ. 2015

แสดงค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ของสถานีโกโตตาบัง ตั้งแต่เวลา 06.00 น. จนถึงเวลา 05.00 น. แบบรายฤดูกาลในช่วงปี ค.ศ. 2010 ซึ่งจะแสดงในตารางที่ 4.7 และ ปี ค.ศ. 2015 แสดงในตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่ได้จากการเก็บข้อมูลที่สถานีโกโตตาบัง ผลลัพธ์ในตารางที่ 4.7 และ ตารางที่ 4.8 จะแสดงค่าของพารามิเตอร์  $hmF2$  จะมีค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงแต่ละฤดูกาลเทียบกับค่าเฉลี่ยของแต่ละแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก พบว่ามีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันในแต่ละรายชั่วโมงคือ  $hmF2$  ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือกจะทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันหรือประมาณ 6.00 น.จนถึง 17.00 หรือก่อนช่วงพระอาทิตย์ตกและทำนายสูงไปในช่วงเวลากลางคืน สังเกตให้เห็นว่าในปี ค.ศ. 2010 และปี ค.ศ. 2015 ในเวลากลางวันช่วงฤดูกาล June Solstice จะมีค่าที่สูงกว่าในฤดูกาลอื่น ๆ เช่นเดียวกับสถานีเชียงใหม่ และ สถานีชุมพร

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีโกโตตาดั้ง  
ในปี ค.ศ. 2010

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีโกโตตาดั้งในปี ค.ศ.2010																
ราย ชั่วโมง (น.)	March Equinox (มีนาคม-เมษายน)				June Solstice (พฤษภาคม-สิงหาคม)				September Equinox (กันยายน-ตุลาคม)				December Solstice (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)			
	Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model		
		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
06.00	474	327	327	353	439	301	301	330	482	340	340	356	532	368	368	377
07.00	466	320	320	336	438	302	302	323	445	334	334	341	501	367	367	364
08.00	454	311	311	320	441	300	300	311	432	329	329	328	494	361	361	350
09.00	420	305	305	314	420	294	294	296	422	327	327	324	484	347	347	345
10.00	411	305	305	322	380	288	288	282	400	326	326	330	447	333	333	349
11.00	404	305	305	336	341	283	283	269	367	325	325	338	407	331	331	356
12.00	394	300	300	346	319	281	281	259	352	324	324	341	389	343	343	358
13.00	399	301	301	343	301	287	287	254	332	327	327	333	391	357	357	349
14.00	405	321	321	325	286	303	303	254	301	340	340	314	399	366	366	329
15.00	353	335	335	297	266	316	316	258	287	341	341	291	365	376	376	305
16.00	316	324	324	272	273	309	309	266	259	323	323	274	311	389	389	285
17.00	283	310	310	259	286	303	303	273	257	306	306	269	285	386	386	276
18.00	283	295	295	259	292	301	301	278	281	291	291	274	292	374	374	278
19.00	300	287	287	267	276	307	307	277	290	286	286	282	318	364	364	283
20.00	305	292	292	275	271	321	321	271	283	295	295	285	308	355	355	284
21.00	301	303	303	273	274	334	334	262	283	306	306	279	277	340	340	276
22.00	289	307	307	262	283	337	337	253	277	301	301	265	275	315	315	262
23.00	272	300	300	248	285	326	326	249	268	284	284	253	299	287	287	250
24.00	272	285	285	243	292	306	306	253	278	267	267	251	284	270	270	250
1.00	266	272	272	254	283	286	286	266	267	265	265	266	285	275	275	268
2.00	291	271	271	281	302	275	275	284	307	282	282	294	332	302	302	301
3.00	351	287	287	316	338	278	278	304	340	311	311	327	419	333	333	338
4.00	411	310	310	345	369	288	288	320	389	335	335	352	475	356	356	368
5.00	463	325	325	358	413	297	297	329	462	343	343	362	518	366	366	381

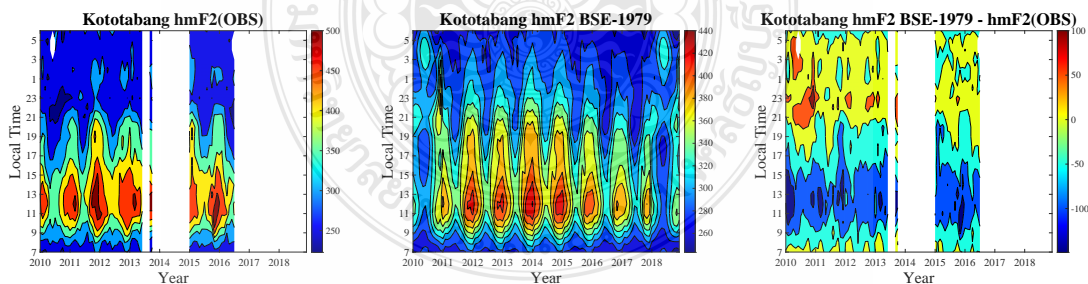
ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีโกโตต้าง  
ในปี ค.ศ. 2015

ค่าเฉลี่ยรายฤดูกาลของค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ.2015																
ราย ชั่วโมง (น.)	March Equinox				June Solstice				September Equinox				December Solstice			
	(มีนาคม-เมษายน)				(พฤษภาคม-สิงหาคม)				(กันยายน-ตุลาคม)				(พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์)			
	Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model		
		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015		BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015
06.00	407	406	374	359	339	399	377	369	367	397	365	354	372	372	345	348
07.00	418	386	372	350	361	391	375	364	378	378	362	342	393	363	353	340
08.00	421	373	369	348	383	384	371	361	401	366	359	335	357	351	358	331
09.00	412	371	364	355	367	378	363	358	371	359	356	338	363	341	353	325
10.00	403	373	363	366	355	367	355	356	351	352	353	346	356	334	337	326
11.00	392	371	374	375	317	348	352	353	340	342	357	352	342	330	326	330
12.00	383	366	396	373	292	332	356	349	312	335	369	350	319	328	339	334
13.00	399	359	412	359	268	324	361	344	326	331	377	339	310	321	366	332
14.00	390	352	405	335	277	323	359	340	313	333	366	322	323	311	387	323
15.00	351	347	376	311	250	328	344	338	302	336	341	307	294	302	400	307
16.00	315	336	357	294	267	331	337	335	296	332	330	297	294	293	400	289
17.00	286	316	336	286	271	325	327	330	298	317	316	295	278	283	398	274
18.00	269	293	309	286	270	313	311	319	293	296	297	296	270	275	393	266
19.00	263	278	291	286	262	301	302	302	268	282	285	292	266	270	384	262
20.00	254	274	291	281	275	293	306	283	250	276	287	281	260	268	374	262
21.00	270	278	303	270	283	288	316	267	262	276	296	263	265	270	361	262
22.00	272	282	309	258	280	284	318	260	275	274	298	247	266	272	341	262
23.00	267	282	302	253	256	282	308	265	242	271	291	241	274	275	317	263
24.00	272	279	289	262	262	279	296	283	298	265	282	252	275	277	296	269
1.00	280	284	286	284	243	293	293	309	277	277	284	280	290	282	288	282
2.00	298	311	301	315	304	324	308	335	306	310	302	314	292	303	294	301
3.00	339	352	329	344	341	361	335	356	355	355	328	345	320	330	305	322
4.00	400	393	355	362	376	390	362	368	350	394	351	363	359	355	319	340
5.00	406	413	370	365	381	402	375	371	364	408	363	364	339	371	333	349

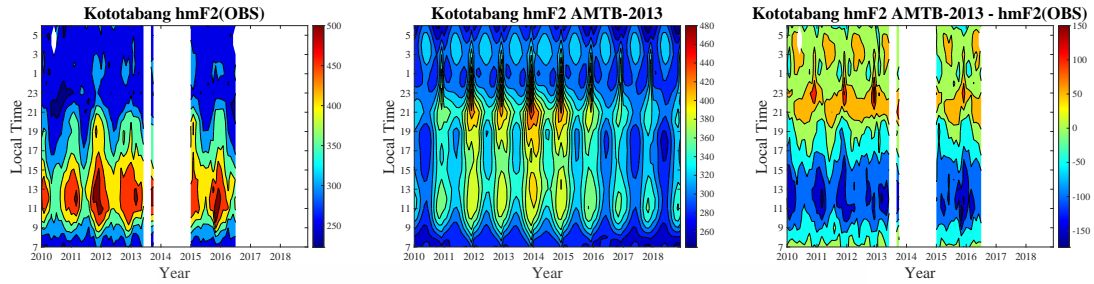
4.1.3.5. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างค่าที่สังเกตได้ hmF2 กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีโกโตตาบัง

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงความแตกต่างของค่าความสูง (กิโลเมตร) พารามิเตอร์ hmF2 ระหว่างค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากภาพไอโนแกรมของสถานีโกโตตาบังกับแบบจำลองทั้ง 3 ตัวเลือก(BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015) ของแบบจำลอง IRI-2016 ตั้งแต่ มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 ผลวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าได้จากการเก็บข้อมูลของสถานีโกโตตาบังจะมีค่าขาดหายไปในช่วงปีเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ในช่วงเวลาดังกล่าว ในช่วงปี 2013 ช่วงเดือน กันยายน และธันวาคม ในปี ค.ศ. 2014 ไปจนถึงต้นปี ค.ศ. 2015 และปี ค.ศ. 2016 ช่วงเดือนเมษายนจนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018

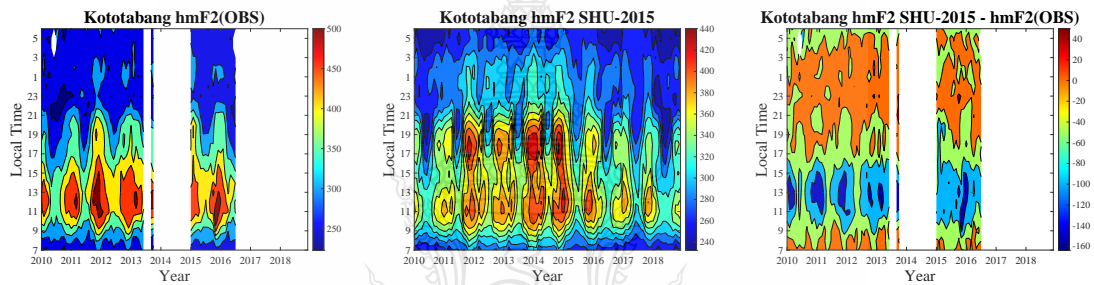
เมื่อพิจารณาความแตกต่างของพารามิเตอร์ hmF2 แสดงในรูปที่ 4.33 ของตัวเลือก BSE-1979 บ่งชี้ว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับค่าที่เก็บวัดได้จากสถานีชุมพร จะมีค่าที่เริ่มสูงขึ้นเกิดขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้น และจะถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวัน 11.00 น. ถึง 13.00 น. และค่อยๆลดต่ำลงจนถึงจุดต่ำสุดหรือก่อนช่วงพระอาทิตย์ขึ้น พบว่าค่าที่คาดการณ์จากแบบจำลองจะคาดการณ์ได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลา กลางวันและจะคาดการณ์สูงไปในช่วงเวลากลางคืน ต่อมาตัวเลือก AMTB-2015 แสดงในรูปที่ 4.34 พบว่า จะมีแนวโน้มใกล้เคียงกันกับตัวเลือก BSE-1979 เฉพาะเดือนธันวาคมจะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลากลางคืน ค่าของ AMTB-2013 คาดการณ์ค่อนข้างผิดพลาดในช่วงเวลาดังกล่าวและตัวเลือก SHU-2015 แสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวเลือก BSE-1979



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีโกโตตาบัง



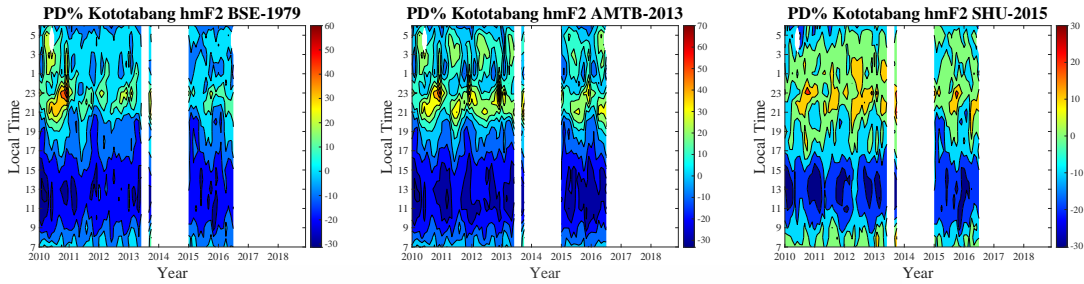
รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก AMTB-2013 ของสถานีโกโตตบบัง



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{OBS}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก BSE-1979 ของสถานีโกโตตบบัง

#### 4.1.3.6. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกตได้ $hmF2$ กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีโกโตตบบัง

ผลการเปรียบเทียบแบบ Contour plot แสดงผลค่าเฉลี่ยรายปีระหว่างค่าที่สังเกตได้ของสถานีโกโตตบบังพารามิเตอร์  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015 ตั้งแต่ มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 พบว่าทั้ง 3 ตัวเลือกจะแสดงแนวโน้มและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันระหว่างการค่าที่สังเกตได้กับแบบจำลอง IRI พบว่าการทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ได้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน ที่ทำนายได้ต่ำเกินไปในช่วงเวลากลางวันและทำนายสูงไปในช่วงเวลากลางคืน ตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือตัวเลือก BSE-1979 และ SHU-2015 ซึ่งจะแสดงผลได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากที่สุด



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของเฉลี่ยแบบรายปีของค่าที่ค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{Obs}$  เทียบกับค่าพารามิเตอร์  $hmF2_{IRI}$  ตัวเลือก ทั้ง 3 ของสถานีโกโตต้าง

4.1.3.7. เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ระหว่างค่าที่สังเกตได้  $hmF2$  กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือก สถานีโกโตต้าง

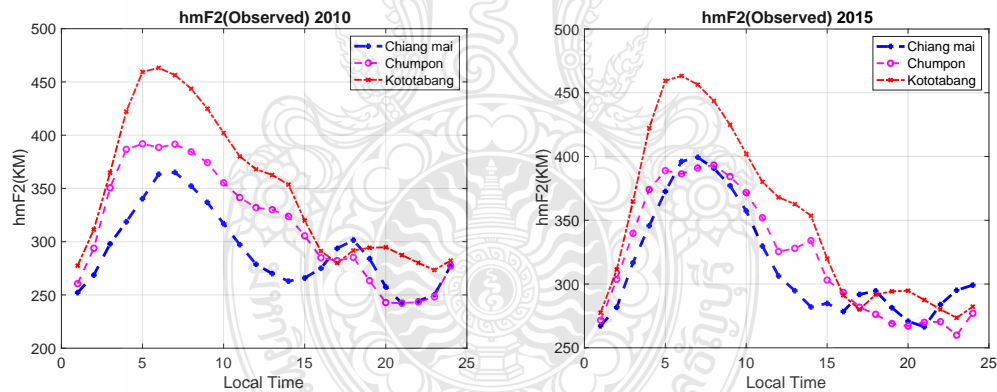
ผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ(ในปี ค.ศ. 2010) และสูง (ในปี ค.ศ. 2015) พบว่าในปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์สูงจะมีค่าความสูงของ  $hmF2$  ที่สูงกว่าปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำสังเกตเห็นได้ว่า ค่าที่ทำการเก็บวัดได้จากสถานีโกโตต้าง แสดงดังในตารางที่ 4.9 พบว่าในช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น (06.00 น.-7.00 น.) ค่าที่ได้จากการวัดจะเห็นได้ว่าปีที่มีปฏิกิริยาสูงจะมีค่าของพารามิเตอร์  $hmF2$  ที่สูงกว่าปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำในทำนองเดียวกันกับแบบจำลอง ทั้ง 3 ตัวเลือกที่มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ  $hmF2$  มีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์หรือปีที่มีปฏิกิริยาสูงและต่ำที่มีผลต่อขนาดความสูงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงของสถานีโกโตต้างในปี ค.ศ. 2010 และ ปี ค.ศ. 2015

ผลการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระหว่างปีที่มีปฏิกิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูงของสถานีโกโตต้าง																
ปี ค.ศ.	เวลาพระอาทิตย์ขึ้น (06.00-7.00)				เวลาเที่ยงวัน (11.00-13.00)				เวลาพระอาทิตย์ตก (17.00-19.00)				เวลากลางคืน (20.00-05.00)			
	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe	IRI-2016 model			Observe
BSE- 1979	AMTB- 2013	SHU- 2015	BSE- 1979		AMTB- 2013	SHU- 2015	BSE- 1979		AMTB- 2013	SHU- 2015	BSE- 1979		AMTB- 2013	SHU- 2015	BSE- 1979	
2010	279	261	279	253	390	375	344	330	343	323	320	315	282	293	318	289
2015	282	273	290	270	385	403	363	367	357	351	358	357	284	311	339	298

## 4.2 ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้ง 3 สถานีแบบรายปี

ในหัวข้อนี้แสดงผลการวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของทั้ง 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ (เส้นประสีน้ำเงิน), สถานีชุมพร (เส้นประสีม่วงแดง) และสถานีโกโตตาบัง (เส้นประสีแดง) จะแสดงค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ hmF2 เป็นค่าเฉลี่ยรายปีโดยจะยกตัวอย่างในปีที่มีปฏิบัติการพระอาทิตย์ต่ำและสูงหรือในปี ค.ศ. 2010 และ ปี ค.ศ. 2015 เมื่อทำการเปรียบเทียบของสถานีทั้ง 3 พบว่าค่าพารามิเตอร์ hmF2 ของสถานีโกโตตาบังมีค่าพารามิเตอร์ที่สูงที่สุดในช่วงเวลาเที่ยงวัน ต่อมาเป็นสถานีชุมพร และท้ายสุดสถานีใหม่ ตามลำดับ เนื่องจากอาจจะเกิดความแปรปรวนบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) และ ปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์จึงมีผลต่อการแปรปรวนของอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ กล่าวคือพารามิเตอร์ hmF2 จะมีการเปลี่ยนแปลงแปรผันตามปริมาณจุดดับบนดวงอาทิตย์ซึ่งในปีที่มีปฏิบัติการพระอาทิตย์สูงค่าพารามิเตอร์จะสูงกว่าที่มีปฏิบัติการพระอาทิตย์ต่ำนั่นเอง



รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทั้ง 3 สถานีในปี ค.ศ. 2010 และ ปี ค.ศ. 2015

### 4.3 สรุป

ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หรือ hmF2 ของทั้ง 3 สถานี ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร และสถานีโกโตตาบัง กับทั้ง 3 ตัวเลือก (BSE-1979, AMTB-2013 และ SHU-2015) ของแบบจำลอง IRI-2016 พบว่าจะมีลักษณะแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือจะมีค่าเริ่มสูงขึ้นช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้นหรือประมาณ 06.00 น.จนถึงจุดสูงสุดในช่วงเวลาประมาณเที่ยงวันหรือ 11.00-13.00 น. จะค่อยๆลดต่ำลงจนถึงระดับต่ำสุดในช่วงพระอาทิตย์ตก 18.00-20.00 น.และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นหรือในช่วงเช้าวันถัดไป โดยที่การทำนายทั้ง 3 ตัวเลือกจะคาดการณ์ได้ต่ำเกินไปในเวลากลางวันและจะประเมินค่าสูงเกินไปในช่วงเวลากลางคืน พบว่าค่าที่วัดได้จากสถานีเชียงใหม่ ตัวเลือกที่เหมาะสมในการใช้งานเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบได้ใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุดคือ SHU-2015 สถานีชุมพรตัวเลือกที่เหมาะสมมีตัว 2 ตัวเลือก ได้แก่ SHU-2015 และ BSE-1979 สามารถใช้งานได้ตามความเหมาะสม และสถานีโกโตตาบัง ตัวเลือกที่เหมาะสม ได้แก่ SHU-2015 และ BSE-1979 เช่นเดียวกับสถานีชุมพร

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในช่วงปี 2000-2007 Thu et al.[5] ได้ศึกษาข้อมูล foF2 และ hmF2 จากสถานีไอโอโนซอน 2 แห่งในเวียดนาม ได้แก่ Phu Thuy และ Bac Lieu เปรียบเทียบกับแบบจำลอง IRI-hmF2 (AMTB-2013 และ SHU-2015) สองรุ่นในช่วงกิจกรรมแสงอาทิตย์ที่สูงสุดและต่ำ โดยตัวเลือกที่ดีที่สุดของสถานีเวียดนามในช่วงกิจกรรมแสงอาทิตย์ที่สูงสุดและต่ำ คือตัวเลือก SHU-2015 ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่เราได้จัดทำขึ้น





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การสื่อสารทางโทรคมนาคมปัจจุบันมีความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทางการสื่อสารทำให้มนุษย์ในปัจจุบันสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้แม้ว่าจะอยู่ห่างไกลกัน จึงได้มีการศึกษาการส่งสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เพื่อใช้ในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในระยะทางไกล ตลอดจนนำมาใช้ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยที่การส่งสัญญาณบางช่วงอาจเกิดความแปรปรวนของอิเล็คตรอนภายในชั้นบรรยากาศ และเพื่อนำไปออกแบบและพัฒนาเกี่ยวกับการติดต่อสื่อสารผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงมีวัตถุประสงค์ ในการศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ M(3000)F2 และ hmF2 ในเวลาที่ต่าง ๆ กันเป็นรายชั่วโมงได้มาจากการเก็บข้อมูลจากสถานีไอโอโนซอนด์ ทั้งหมด 3 สถานีคือ สถานีชุมพร สถานีเชียงใหม่ ประเทศไทย และสถานีโกโตตาบัง ประเทศอินโดนีเซีย โดยการเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคมปี ค.ศ.2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ.2018 ทำศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่สังเกตได้เทียบกับ แบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกได้แก่ AMTB-2013 SHU-2015 และ BSE-1979 ตั้งแต่มกราคมปี ค.ศ. 2010 จนถึงเดือนธันวาคมปี ค.ศ. 2018 แบบรายชั่วโมง รายวัน รายฤดูกาล รายปี รวมถึงความแตกต่างระหว่างปี ที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำและสูง ซึ่งได้ยกตัวอย่างผลของปี ค.ศ. 2010 เป็นปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์ต่ำ และ ปี ค.ศ.2015 เป็นปีที่มีปฏิริยาจากดวงอาทิตย์สูง ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ผลลัพธ์ของสถานีเชียงใหม่ สถานีชุมพร และสถานีโกโตตาบัง กับแบบจำลอง IRI-2016 ทั้ง 3 ตัวเลือกจะแสดงแนวโน้มและมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกันระหว่างการค่าที่สังเกตได้กับแบบจำลอง IRI พบว่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ hmF2 จะค่อยๆสูงขึ้นในช่วงพระอาทิตย์ขึ้นหรือตั้งแต่ช่วง 6.00 น. จนมีค่าสูงสุดในช่วงกลางวันเวลาประมาณ 11.00น. ถึง 13.00 น.จากนั้นพารามิเตอร์ hmF2 จะค่อย ๆ ลดลงจนมีค่าต่ำสุดในช่วงก่อนพระอาทิตย์ขึ้น

5.2 จากผลการวิเคราะห์ตัวเลือกที่เหมาะสมกับสถานีทั้ง 3 สถานี สถานีเชียงใหม่ ตัวเลือกที่เหมาะสมกับการคาดการณ์ที่ดีที่สุดคือ SHU-2015 สถานีชุมพรตัวเลือกที่ดีที่สุดคือ ตัวเลือกของ BSE-1979 และ SHU-2015 สุดท้ายสถานีโกโตตาบัง ตัวเลือกที่เหมาะสมคือตัวเลือก BSE-1979 และ SHU-2015

ข้อเสนอแนะข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ในพื้นที่ EIA ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง IRI จึงทำให้แบบจำลองมีความผิดพลาดในการทำนายพารามิเตอร์ hmF2 ในพื้นที่บริเวณ EIA อยู่จึงเหมาะแก่การสร้างแบบจำลองเฉพาะถิ่นขึ้นมาเพื่อให้มีความแม่นยำในการทำนายมากยิ่งขึ้น



## บรรณานุกรม

- [1] Oocities “ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (The Ionosphere)” [Online]. Available :  
[https://www.oocities.org/ten\\_2548/chapter8.html](https://www.oocities.org/ten_2548/chapter8.html)
- [2] Oocities “International Union of Radio Science (URSI)” [Online]. Available:  
<https://council.science/member/international-union-radio-science-ursi/>
- [3] X., Zhao, B., Ning, M.L., Zhang, L., Hu, “Comparison of the ionospheric F2 peak height between ionosonde measurements and IRI2016 predictions over China,” Adv. Space Res., Vol. 60, No. 7, pp. 1524–1531, 2017.
- [4] O.S., Oyekola, “Comparison of IRI-2016 model-predictions of F2- layer peak density height options with the ionosonde derived-hmF2 at the equatorial station during different phases of solar cycle,” Adv. Space Res., Vol. 64, pp. 2064–2076, 2019.
- [5] H.P.T., Thu, C.A., Mazaudier, M.L., Huy, D.N., Thanh, H.L., Viet, N.L., Thi, K., Hozumi, T.L., Truong, “Comparison between IRI-2012, IRI-2016 models and F2 peak parameters in two stations of the EIA in Vietnam during different solar activity periods,” Adv. Space Res., In Press, Corrected Proof, 2020.
- [6] Oocities “ขบวนการไอออโนสเฟียร์” [Online]. Available:  
<https://www.oocities.org/thana755/index2.html>
- [7] Oocities “เส้นรุ้งแม่เหล็กบนแผนที่ตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์” [Online]. Available:  
[http://elsd.ssru.ac.th/araya\\_pa/pluginfile.php/610/block\\_html/content/พิกัดทางภูมิศาสตร์.pdf](http://elsd.ssru.ac.th/araya_pa/pluginfile.php/610/block_html/content/พิกัดทางภูมิศาสตร์.pdf)
- [8] Oocities “การศึกษาคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์” [Online]. Available:  
<https://www.thaiscience.info/Journals/Article/NETC/10438511.pdf>
- [9] Oocities “วิจัยกรสุริยะ” [Online]. Available:  
<https://paipibat.com/?p=3237>

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Oocities “การแบ่งฤดูกาล”[Online].Available :  
<http://www.lesa.biz/astro-events/seasons>
- [11] Oocities “Ionosonde & Ionogram”[Online].Available :  
<https://www.electronics-notes.com/articles/antenna-spropagation/ionospheric/ionosonde-ionogram.php>
- [12] Oocities “บริเวณที่ตั้งสถานี Ionosonde ทั่วโลก”[Online].Available :  
[https://www.researchgate.net/figure/Global-map-of-used-ionosonde-stations-including-15-verification-stations\\_fig1\\_233399592](https://www.researchgate.net/figure/Global-map-of-used-ionosonde-stations-including-15-verification-stations_fig1_233399592)
- [13] Oocities “สถานีไอโอโนซอนด์ในบริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้”[Online].Available :  
[https://www.researchgate.net/figure/The-location-of-the-ionosonde-stations-over-Southeast-Asia\\_fig1\\_313712298](https://www.researchgate.net/figure/The-location-of-the-ionosonde-stations-over-Southeast-Asia_fig1_313712298)
- [14] T., Shimazaki, “World-wide variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer,” J. Radio Res. Labs. Japan, Vol. 2, No. 7, pp. 85-97, 1955.
- [15] Oocities “IRI-2016 model”[Online].Available :  
[https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016\\_vitmo.php](https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php)
- [16] D., Bilitza, N.M., Sheikh, R., Eyfrig, “A global model for the height of the F2-peak using M(3000)F2 values from the CCIR numerical map,” Telecommun. J., Vol. 46, pp. 549–553, 1979.
- [17] D., Altadill, S., Magdaleno, J.M., Torta, E., Blanch, “Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions,” Adv. Space Res., Vol. 52, pp. 1756–1769, 2013.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] V.N., Shubin, "Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based digisonde observations," Adv. Space Res., Vol. 56, pp. 916–928, 2015.
- [19] นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์. "การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟคเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ บริเวณละติจูดต่ำ" ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551
- [20] Prof.Dr.Pornchai Supnithi "Ionospheric Observatory station at Chumphon, Thailand" [Online]. Available : [http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page\\_id=668](http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=668)
- [21] NICT "SouthEast Asia Low-latitude IONospheric Network (SEALION)" [Online]. Available : <https://aer-nc-web.nict.go.jp/sealion/>
- [22] Oocities "Committee on Space Research (COSPAR)" [Online]. Available : <https://council.science/what-we-do/affiliated-bodies/committee-on-space-research-cospar/>
- [23] K., Davies. **Ionospheric Radio**. London : Peter Peregrinus, Ltd. 1990.
- [24] M., Nakamura "Quick Reference of Manual Scaling for SPECIAL scaling from Manual of Ionogram Scaling," Communications Research laboratory. Tokyo, Japan, 2003.
- [25] S. Khuangsatung, N., Wichaipanich, K., Hozumi, " Comparison of ionospheric F2-layer peak height (hmF2) derived by ionosonde with IRI-2016 model at Chumphon, Thailand," Adv. Space Res., Vol., 52, pp. 1748-1755, 2013.
- [26] ] T. Maruyama, M. Kawamura, S. Saito, K. Nozaki, H. Kato, N. Hemmakorn, T. Boonchuk, T. Komolmis and C. Ha Duyen, "Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia," Ann. Geophys., Vol. 25, pp. 1596-1577, 2007.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [27] Oocities, “International Reference Ionosphere (IRI)” [Online].Available :  
<https://irimodel.org>



ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 1) N. Sakrapop, N. Wichaipanich, K. Hozumi, “20 May 2021 “Comparison of ionospheric F2-layer peak height ( $h_mF_2$ ) derived by ionosonde with IRI-2016 model at Chumphon, Thailand, ” The 2021 18<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp, 2021



# Comparison of ionospheric F2-layer peak height (hmF2) derived by ionosonde with IRI-2016 model at Chumphon, Thailand

1<sup>st</sup> Sakkrapop Khuangsatsung  
Department of Electronics and  
Telecommunication Engineering,  
Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology  
Thanyaburi,  
Pathum Thani, Thailand  
1163604210075@mail.rmutt.ac.th

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

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

**Abstract**—In this paper, the ionospheric F2-layer peak height (hmF2) is investigated and compared with the International Reference Ionosphere 2016 (IRI-2016) model over Thailand equatorial latitude station, namely Chumphon (10.72°N, 99.37°E, dip angle 3.0°N). The hmF2 values are derived from M(3000)F2 values that are manually scaled from the ionograms recorded by the ionosonde measurement. The hmF2 values predicted by IRI-2016 model are 3 options as (1) BSE-1979, (2) AMTB-2013, and (3) SHU-2015. The monthly hourly median of hmF2 values in March, June, September, and December of the year 2009 are analyzed the hourly, daily and monthly variations during low solar activity. The results show similar trends between observed and modeled in that they increase from sunrise to noontime hours and decrease from afternoon to pre-sunrise hours. Three options of the IRI-2016 model predicts hmF2 values underestimate for daytime and overestimate for nighttime. The BSE-1979 option shows the best agreement while the AMTB-2013 option shows the worst over Chumphon equatorial latitude station. The hmF2 percentage deviation (%PD) changes from -20% to 10% at daytime and varies among 0% and 30% for nighttime. These comparative results are used to improve the IRI model in the future.

**Keywords**— Ionosonde, hmF2, IRI-2016 model, Solar activity

## I. INTRODUCTION

The F layer is the highest electron density ( $10^5 \text{ cm}^{-3}$  to  $10^6 \text{ cm}^{-3}$ ) and is the highest layer (140 km to 1,000 km or more) of the ionosphere [1]. It separates into F1 and F2 layers during the daytime and combines as the F layer during the nighttime. The F2 layer is the most important layer for HF communication since its altitude allows the longest communication paths, and it is present 24 hours of the day, and it can refract the frequency in the HF propagation. However, the variability of the F2 layer depends on time, location, and solar activity. Therefore, accurate characterization of the F2 layer is necessary to ionospheric understanding and HF communications designing and has been widely studied with the ionosonde.

Ionosonde is a special radar system used to measure the altitude and frequency of E, F1, and F2 layers. This technique employs a radio transceiver to transmit and receive in near-vertical incident skywave (NVIS). The Frequency Modulated-Continuous Wave (FM/CW) ionosonde is one type of ionosondes that continuously transmits the radio frequency signal from 2 MHz to 30 MHz with increases the frequency to 100 kHz/s. Every 5 minutes, the signal reflects the ionosphere and returns to the receiver is transfer to the image, called the

ionogram. The ionogram is illustrated the altitude ( $h'$ ), the critical frequency ( $f_o$ ), and the extra frequency ( $f_x$ ) of the E, F1, and F2 layers [2]. Many parameters obtained by the ionograms are widely used to examine the ionospheric models, i.e. the E-layer critical frequency ( $f_oE$ ) and F2-layer critical frequency ( $f_oF2$ ), the propagation factor at a distance 3,000 km ( $M(3000)F2$ ), the F2-layer peak height (hmF2), etc.

The F2-layer peak height (hmF2) is the maximum altitude of the F2 layer and is the highest electron density region. The hmF2 value can derive from the ionospheric propagation factor  $M(3000)F2$  using the Shimazaki's formula [3] as follows

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2 - 176} \quad (1)$$

where the  $M(3000)F2$  values are manually scaled from the ionograms recorded by the ionosonde [3]. The hmF2 is one of the most widely used in ionospheric understanding and modeling.

The International Reference Ionosphere (IRI) is one of the most widely recommended ionospheric empirical models. It is the standard model sponsored by the Committee on Space Research and the International Union of Radio Science (URSI) [4]. The data source of the IRI model are the worldwide network of ionosondes/Digisondes, the incoherent scatter radars, the topside sounder, the in-situ measurements (Rockets and satellites). This model is yearly updated and the last version occurs in 2016, called the IRI-2016 model [5]. This model has 3 options to predicts the hmF2 values consist of the BSE-1979 option, the AMTB-2013 option, and the SHU-2015 option. The BSE-1979 option is the oldest version was proposed by Bilitza et al., [6] that uses the relationship between hmF2,  $M(3000)F2$  and the ccir-1965 model. The AMTB-2013 option was presented by Altadill et al., [7] that uses the data from 26 digisonde stations of the Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) network during 1998-2006. The SHU-2015 option is the latest version was proposed by Shubin [8] that uses the CHAMP, GRACE, and COSMIC satellites and 62 digisonde station during 1987-2012.

Many publications have compared the hmF2 observations with 3 options of the IRI-2016 model predictions [9]-[12]. The hmF2 derived by 3 ionosonde stations over China, namely Mohe, Beijing, Sanya, and Wuhan, during 2007-2016 compared with the IRI-2016 model was presented by Zhao et



al., [9]. Oyekola [10] was proposed the three IRI-hmF2 models compared with the observed hmF2 at equatorial latitude station in Burkina Faso, namely Ouagadougou. The data used ranging from January to May 1986, and during 1987-1990. In [11], the hmF2 data at Milestone Hill compared with three IRI-hmF2 models during low and high solar activity of the 24<sup>th</sup> solar cycle was presented. In [12], the foF2 and hmF2 data from 2 ionosonde stations in Viet Nam, namely Phu Thuy and Bac Lieu, compared with two IRI-hmF2 (AMTB-2013 and SHU-2015) models during high (2000) and low (2007) solar activity was investigated. Although the hmF2 data compared with the IRI model in Thailand was proposed by Wichaipanich et al., [13], however, only compared with the IRI-2007 model while the three IRI-hmF2 2016 models have been lack. Therefore, the hmF2 derived by the ionosonde compared with three IRI-hmF2 2016 models are examined in this paper. The data and analysis methods, the results and discussions, and the conclusions are illustrated in Sections II, III, and IV, respectively.

## II. DATA AND ANALYSIS METHODS

### A. Data used

In this work, the hmF2 data derived by Shimazaki's formula was obtained from the M(3000)F2 data recorded by the ionosonde at Chumphon (10.72°N, 99.38°E, Dip 3.0°), Thailand. The hourly hmF2 data in March, June, September, and December in 2009 are investigated the hourly, daily, and monthly variations during low solar activity. Chumphon station is one of six ionosonde stations under the Southeast Asia Low-latitude Ionospheric Network (SEALION) project sponsored by the National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan [14]. This station was installed at King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang (KMITL), Chumphon campus, Thailand. This location is located near the magnetic equator. The M(3000)F2 data are manually scaled from the ionograms by using the special-10C-2000-eng.exe program as illustrated in Fig. 1. The sunspot number during the 19-24 solar cycle (from 1950 to 2020) is shown in Fig. 1. The data in 2009 indicated the low solar activity.

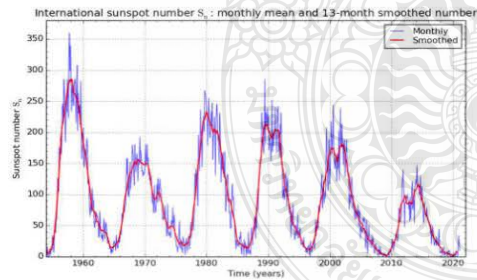


Fig. 1. Solar cycle sunspot number from 1950 to 2020 [15].

### B. Analysis methods

The percentage deviation (%PD) is examine the error between the observed hmF2 and three IRI-hmF2 2016 models. The %PD is computed from

$$\%PD = \left( \frac{hmF2_{IRI} - hmF2_{OBS}}{hmF2_{OBS}} \right) \times 100, \quad (2)$$

where the hmF2<sub>OBS</sub> values are the observed data of hmF2 from Chumphon station. The hmF2<sub>IRI</sub> values refer to the hmF2 predicted by the BSE-1979 (BSE-1979), the AMTB-2013 (AMTB-2013), and the SHU-2015 (SHU-2015) options, respectively.

## III. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results and discussions can divide into 3 parts in that Hourly variations, Dairy variations, and Monthly variations as follows. The data in March and September refer to March and September equinox seasons while the data in June and December refer to June and December solstice seasons.

### A. Hourly variations

Fig. 2 shows the comparison between the observed hmF2 and three IRI-hmF2 2016 model over Chumphon station at 12LT (Top-left), 18LT (Top-right), 00LT (Bottom-left), and 06LT (Bottom-right), respectively. The black solid line is the hmF2 derived by the ionosonde (Observed), the blue dashed line is the AMTB-2013 (AMTB-2013) option, the magenta dotted line for the SHU-2015 (SHU-2015) option, and the red dash-dotted line for the BSE-1979 (BSE-1979) option, consecutively. The observed hmF2 values are lack during sometime since the M(3000)F2 data cannot scaled from the ionograms during these time. The results at noontime (12LT) show the observed hmF2 are higher than those three options of the IRI-2016 model, similarly at sunset (18LT). The results at midnight (00LT) and sunrise (06LT) are similar in that the observed is lower than those three options. Although three options of the IRI-2016 model predicts hmF2 values underestimate during daytime and overestimate during nighttime, however, the BSE-1979 show the best agreement when compared with the observed values. Besides, the hmF2 values during daytime hours (about 300-450 km) are higher than that during nighttime hours (about 220-350 km).

### B. Daily variations

The example of the daily variations on 25<sup>th</sup> March 2009 and 5<sup>th</sup> December 2009 is illustrated in the left and right panels of Fig. 3, respectively. The observed hmF2 is the black solid line, while the AMTB-2013 option is the blue plus sign-dashed line, the SHU-2015 is the magenta circle dashed line, and the BSE-1979 show by the red cross dash-dotted line. Most of the results show a similar trend between the observed and modeled in that they increase after sunrise with the maximum values occur at pre-noontime (10-11LT) hours. After noontime hours, they decrease until the minimum levels occur at pre-sunrise (3-6LT) hours. Most of the results show three options of the model underestimate the observed during daytime and overestimate during nighttime. The BSE-1979 show good agreement for all of the days.

### C. Monthly variations

The hourly monthly median of hmF2 observations compared with the IRI-hmF2 model predictions in March, June, September, and December 2009 over Chumphon is shown in Fig. 4. Similarly, most of the results indicate that three options underestimate at daytime for all months except in December when the BSE-1979 option is close to the measured ones. During nighttime, they overestimate the derived data. However, both SHU-2015 and BSE-1979 options show agreement while the AMTB-2013 option is the worst especial in December. The highest value of the observed hmF2 occurs in June while the lowest level appears in September.

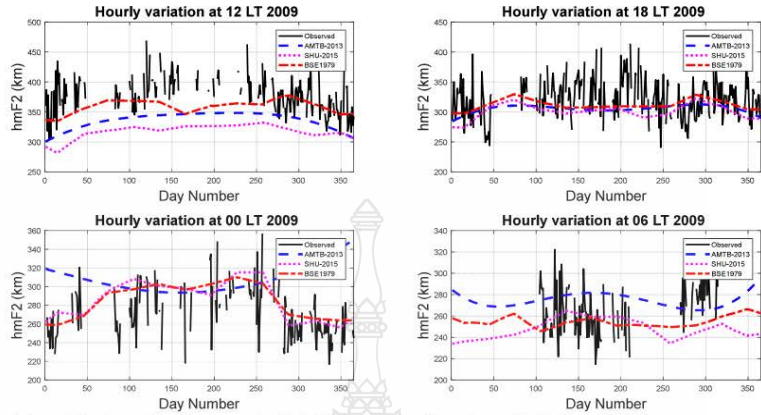


Fig. 2. Hourly variations of the observed hmF2 compared with the IRI model over Chumphon at 12, 18, 00, and 06 LT.

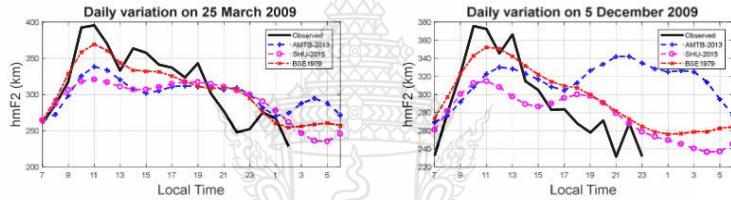


Fig. 3. Daily variations of the observed hmF2 compared with the IRI model over Chumphon on 25<sup>th</sup> March 2009 and 5<sup>th</sup> December 2009.

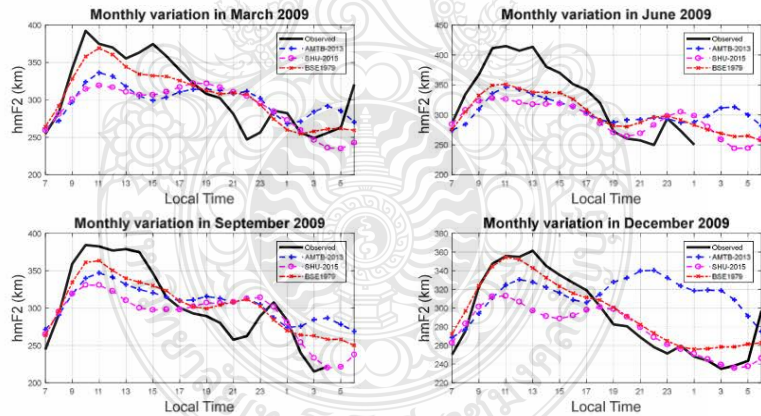


Fig. 4. Monthly comparison between the observed hmF2 and the IRI-2016 model over Chumphon at March, June, September, and December 2009.

**D. Comparison of the hmF2 percentage deviation**

Fig. 5 show the hmF2 percentage deviation (%PD) between the ATMB-2013 (Blue plus sign-dashed line), SHU-2015 (Magenta circle dashed line), and BSE-1979 (Red cross dash-dotted line) options in March, June, September, and December 2009 over Chumphon. The results in March indicates the %PD of AMTB-2013 and SHU-2015 options are similar values in that they change between -20% and 25%, except at pre-sunrise hours, vary

from -25% to 0% for the SHU-2015 and 0% to 15% for the AMTB-2013. The %PD of the BSE-1979 option varies during  $\pm 10\%$  except at 21-23LT (10-25%) and 6LT (-20%). In June, three options change between -25 and 0% for daytime while they vary from 0-10% for nighttime. The results in September are similar in March. In December, the worst values appear in the SHU-2015 option during daytime and occur at the AMTB-2013 option during nighttime. The best agreement appears at the BSE-1979 option.

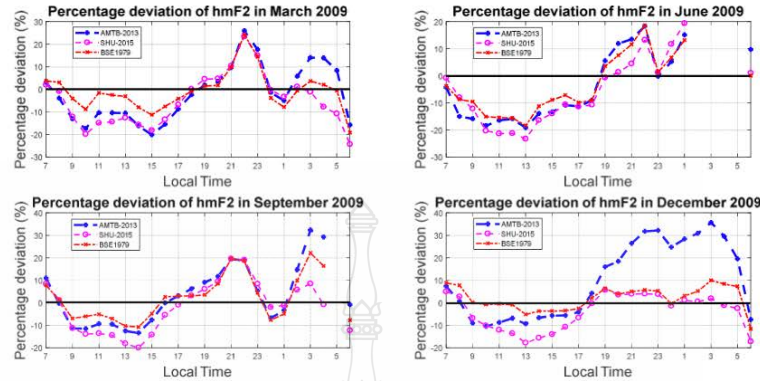


Fig. 5. Comparison of the hmF2 percentage deviation over Chumphon at March, June, September, and December 2009.

When compare with previous works, our results are similar to the results in [9]-[12] in that three options of the IRI model and the calculated hmF2 show similar trends. Most of studies show the worst agreement predicts by the AMTB-2013 except the results in [10] when the worst provides by the SHU-2015 option. Furthermore, our works differ from [9], [11] in that they found the best provides by the SHU-2015 option, followed by the BSE-1979 and the AMTB options. However, our results show the best prediction provides by the BSE-1979 option, followed by the SHU-2015 option. Moreover, our results show three options underestimate during daytime and overestimate during nighttime, while other works show these options are close to the observed hmF2.

#### IV. CONCLUSIONS

The hmF2 derived from ionosonde at Chumphon equatorial latitude station during low solar activity in 2009 are analyzed the hourly, daily, and monthly variations and compared with three options (AMTB-2013, SHU-2015, BSE-1979) provides by the IRI-2016 model. The results show similar trends in variation between the observed and the modeled. However, the model predicts hmF2 values underestimate during daytime and overestimate during nighttime. The best agreement provides by the BSE-1979 option, followed by the SHU-2015 and the AMTB-2013 options, respectively. The %PD changes between -20% and 5% for daytime while varies from 0% to 25% for nighttime. The accuracy of hmF2 predictions recommended improving the IRI model, especial over equatorial latitude regions.

#### ACKNOWLEDGMENT

We would like to thanks the Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand and National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Japan, for the data supported.

#### REFERENCES

[1] K., Davies. Ionospheric Radio. London : Peter Peregrinus, Ltd. 1990.  
 [2] M., Nakamura "Quick Reference of Manual Scaling for SPECIAL scaling from Manual of Ionogram Scaling." Communications Research laboratory. Tokyo, Japan, 2003.

[3] T., Shimazaki, "World-wide variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer," J. Radio Res. Labs. Japan, Vol. 2, No. 7, pp. 85-97, 1955.  
 [4] D., Bilitz, "International Reference Ionosphere 1990", National Space Science Data Center, Report 90-22, Greenbelt, Maryland, USA, 1990.  
 [5] D., Bilitz, D., Altadill, V., Truhlik, V.N., Shubin, I., Galkin, B., Reinisch, X., Huang, "International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climateto real-time weather predictions," Space weather, Vol. 15, pp. 418-429, 2017.  
 [6] D., Bilitz, N.M., Sheikh, R., Eyfrig, "A global model for the height of the F2-peak using M(3000)F2 values from the CCIR numerical map," Telecommun. J., Vol. 46, pp. 549-553, 1979.  
 [7] D., Altadill, S., Magdaleno, J.M., Torta, E., Blanch, "Global empirical models of the density peak height and of the equivalent scale height for quiet conditions," Adv. Space Res., Vol. 52, pp. 1756-1769, 2013.  
 [8] V.N., Shubin, "Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based digisonde observations," Adv. Space Res., Vol. 56, pp. 916-928, 2015.  
 [9] X., Zhao, B., Ning, M.L., Zhang, L., Hu, "Comparison of the ionospheric F2 peak height between ionosonde measurements and IRI2016 predictions over China," Adv. Space Res., Vol. 60, No. 7, pp. 1524-1531, 2017.  
 [10] O.S., Oyekola, "Comparison of IRI-2016 model-predictions of F2-layer peak density height options with the ionosonde derived-hmF2 at the equatorial station during different phases of solar cycle," Adv. Space Res., Vol. 64, pp. 2064-2076, 2019.  
 [11] C.K. Mengist, S. Yadav, K. Kotulak, A. Bahar, S.-R. Zhang, K.-H. Seo, "Validation of International Reference Ionosphere model (IRI-2016) for F-region peak electron density height (hmF2): Comparison with Incoherent Scatter Radar (ISR) and ionosonde measurements at Millstone Hill," Adv. Space Res., Vol. 65, pp. 2773-2781, 2020.  
 [12] H.P.T., Thu, C.A., Mazaudier, M.L., Huy, D.N., Thanh, H.L., Viet, N.L., Thi, K., Hozumi, T.L., Truong, "Comparison between IRI-2012, IRI-2016 models and F2 peak parameters in two stations of the EIA in Vietnam during different solar activity periods," Adv. Space Res., In Press, Corrected Proof, 2020.  
 [13] N., Wichaipanich, P., Supnithi, T., Tsugawa, T., Maruyama, T., Nagatsuma, "Comparison of ionosphere characteristic parameters obtained by ionosonde with IRI-2007 model over Southeast Asia," Adv. Space Res., Vol. 52, pp. 1748-1755, 2013.  
 [14] T. Maruyama, M. Kawamura, S. Saito, K. Nozaki, H. Kato, N. Hemmakorn, T. Boonchuk, T. Komolmis and C. Ha Duyen, "Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia," Ann. Geophys., Vol. 25, pp. 1596-1577, 2007.  
 [15] <http://sidc.be/silso/monthlyssnplot>.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายศักรพันธ์ เชื่องสตุ่ง

วัน-เดือน-ปีเกิด

11 มกราคม 2536

ที่อยู่

บ้านเลขที่ 123 หมู่ 9 ต.ปอแดง อ.ชนบท จ.

ประวัติผู้เขียน

ขอนแก่น ตปณ.40180

จบปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา คณะ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

เบอร์โทรศัพท์

0969478463

อีเมล

bush\_sp@hotmail.com

