แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิกึ่งเรียลไทม์สำหรับการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทย

NEAR REAL-TIME TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) MAP FOR IONOSPHERIC STUDY OVER THAILAND

นันทวิทย์ วงษ์ทศรัตน์

NANTAVIT WONGTHOTSARAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-M-010-094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NEAR REAL-TIME TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) MAPS FOR IONOSPHERIC STUDY OVER THAILAND

NANTAVIT WONGTHOTSARAT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021

KMITL-2021-EN-M-010-094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2021
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิกึ่งเรียลไทม์สำหรับการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทย
นักศึกษา	นายนันทวิทย์ วงษ์ทศรัตน์
รหัสประจำตัว	62601098
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

บทคัดย่อ

ในระบบดาวเทียมนำร่องจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) สัญญาณคลื่นวิทยุเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และได้รับผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะบริเวณประเทศไทยที่ตั้งอยู่ในเขตละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกจะได้รับผลกระทบที่เกิดจากความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศนี้สูง ซึ่งหนึ่งในพารามิเตอร์ใช้ในการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (Total electron content: TEC) ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีแบบจำลองมาตรฐานสากลที่สามารถประมาณการค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง (Vertical TEC: VTEC) ของทั่วโลกได้ แต่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิของแบบจำลองในช่วงที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความแปรปรวนสูงจะไม่แม่นยำมากนัก เพื่อให้การศึกษาคุณลักษณะและความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยมีความละเอียดถูกต้องและกึ่งเรียลไทม์มากขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอเทคนิคการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ครอบคลุมบริเวณประเทศไทยทั้งหมดด้วยเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน (Gaussian kernel regression) ร่วมกับ Thin plate spline จากระบบดาวเทียมจีพีเอส (Global Positioning System: GPS) และในงานวิจัยได้พัฒนาต่อยอดโปรแกรมในการอ่านค่าสัญญาณจากระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสอันประกอบด้วยระบบ GPS, GLONASS, Galileo และ BeiDou จากข้อมูล Receiver INdependent Exchange (RINEX) เวอร์ชัน 3 และได้นำเสนอเทคนิคในการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบกึ่งเรียลไทม์ด้วย Keogram ซึ่งเป็นการแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแต่ละเวลาในแกนละติจูดและลองจิจูด ทั้งนี้ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการกำหนดให้แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งนั้นถูกสร้างขึ้นอยู่ในช่วงละติจูดที่ 0 ถึง 25 องศาเหนือและช่วงลองจิจูดที่ 95 ถึง 110 องศาตะวันออก โดยในส่วนของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากสัญญาณ GPS พบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เมื่อเทียบกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิของศูนย์การกำหนดวงโคจรในยุโรป (Center for Orbit Determination in Europe: CODE) มีค่า 1.2931 TECu และในส่วนของการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โนสเฟียร์แบบกึ่งเรียลไทม์ด้วย Keogram นั้น พบว่าสามารถแสดงคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยในวันที่เกิดความแปรปรวนได้อย่างชัดเจน 3 ใน 4 วันตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	NEAR REAL-TIME TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) MAP FOR IONOSPHERIC STUDY OVER THAILAND
Student	Mr. Nantavit Wongthotsarat
Student ID.	62601098
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Prof.Dr.Pornchai Supnithi

Abstract

In the Global Navigation Satellite System (GNSS), the signals passing through the ionosphere are degraded by the ionospheric irregularities. This is particularly true over Thailand which is located in the low latitude region and close to the magnetic equator. Total electron content (TEC) is an important parameter for ionospheric characterization. At present, there are ionospheric models that provide the Vertical TEC (Vertical TEC: VTEC) for the global region. Nevertheless, they cannot estimate the actual TEC. In order to study the characteristics and anomalies of the ionosphere in Thailand with a more accurate and closer to real time, this thesis implements the Gaussian kernel regression together with the Thin plate spline method to calculate the TEC map using Global Positioning System (GPS) data. Then a program is developed to read signals from GNSS satellite systems including GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou based on Receiver INdependent Exchange (RINEX) version 3 and propose the ionospheric monitoring with Keogram technique. This represents the change in the TEC for each time in the latitude and longitude axes. The range of Thailand map is defined as 0°–25°N in latitude and 95°-110°E in longitude. The result in the part of TEC map from GPS signal showed that the Root Mean Square Error (RMSE) with Center for Orbit Determination in Europe (CODE) was 1.2931 TECu. In the part of the near real time ionospheric monitoring with Keogram, it was shown that the characteristics of the ionosphere in Thailand were visible on 3 out of 4 sample days.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้ ถ้าหากขาดคำแนะนำของอาจารย์ที่ปรึกษาของผู้เขียน คือ ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ โดยผู้เขียนได้รับคำแนะนำแนวทางการทำวิจัย อีกทั้งสนับสนุนให้ผู้เขียนตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการทำให้ผู้เขียนได้รับประสบการณ์มากขึ้น นอกจากนี้ยังสร้างทรรศนะคติ และวินัยที่ดีในการทำงาน ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณในโอกาสและความเมตตากรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษามอบให้ ผู้เขียนขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยให้ความรู้ทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคม และคอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยของผู้เขียน

ผู้เขียนขอขอบพระคุณหน่วยงาน สนับสนุนทุนวิจัยของผู้เขียน และเอื้อเฟื้อข้อมูลที่ทางผู้เขียนได้นำมาใช้ทดลองในงานวิจัยนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้อง ทุกคน จากห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและสนเทศศาสตร์ด้านอวกาศและชั้นบรรยากาศ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนทำวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่เป็นกำลังใจและแรงผลักดันที่สำคัญของผู้เขียนให้สามารถจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นันทวิทย์ วงษ์ทศรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ I

Abstract III

กิตติกรรมประกาศ IV

สารบัญ V

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูป IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 หัวข้อของวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 สัญญาณจีเอ็นเอสเอส 4

2.2 มาตรฐานข้อมูล Receiver INdependent Exchange (RINEX) 6

2.2.1 ความแตกต่างของเวลาในสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแต่ละระบบในไฟล์ RINEX 6

2.2.2 ไฟล์ Observation RINEX 6

2.2.3 ไฟล์ Navigation RINEX 9

2.2.4 การคำนวณตำแหน่งดาวเทียมจากไฟล์ Navigation RINEX 10

2.3 การคำนวณค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay) 14

2.3.1 การเกิดคลื่นหลุด (Cycle slip) 16

2.3.2 การประมาณค่ากำกวม (Ambiguity) 16

2.3.3 การคำนวณจุดตัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPP) 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4 การแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงเป็นค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง....18
2.3.5 ค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากดาวเทียม....18
2.3.6 ค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากเครื่องรับสัญญาณ....18
2.4 แบบจำลองปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ.... 19
2.4.1 Center for Orbit Determination Europe (CODE)....19
2.4.2 International Reference Ionosphere (IRI) model....20
บทที่ 3 แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่สองมิติ....22
3.1 เทคนิคในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ.... 22
3.1.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ....22
3.1.2 วิธีถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน (Gaussian Kernel Regression)....23
3.1.3 วิธีประมาณค่าด้วย Thin plate spline....25
3.2 เทคนิคในการวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ.... 25
3.2.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการการวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ....26
3.2.2 แผนที่ Rate Of TEC change Index (ROTI)....26
3.2.3 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ....28
3.2.4 การสร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่นำเสนอ....30
3.3 เทคนิคในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์.... 33
3.3.1 เกณฑ์การตัดสินใจของ Keogram ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ....33
3.3.2 สมมติฐานของการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์....35
บทที่ 4 ผลการวิจัย....36
4.1 ผลการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ.... 36
4.2 ผลการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ.... 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากวิธี Thin plate spline ร่วมกับวิธี Gaussian Kernel Regression 40

4.2.2 Cross-validation เพื่อหา RMSE ของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในขณะกึ่งเรียลไทม์.....41

4.2.3 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิเทียบกับแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจาก CODE 43

4.3 ผลการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ 47

4.3.1 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 18 มีนาคม 2563.....47

4.3.2 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563.....51

4.3.3 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 17 มีนาคม 2564.....55

4.3.4 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 25 มีนาคม 2564.....58

4.3.5 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สงบในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564.....61

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะในงานวิจัย 65

5.1 สรุปผลงานวิจัย 65

5.2 ข้อเสนอแนะ 66

เอกสารอ้างอิง 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าความสัมพันธ์ของเวลาดาวเทียมแต่ละระบบใน RINEX 3 6
ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของข้อมูลจีเอ็นเอสเอสวงโคจรระดับกลาง 11
ตารางที่ 3.1 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ 22
ตารางที่ 3.2 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ 26
ตารางที่ 4.1 Cross-validation เพื่อหา RMSE ของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC 43
ตารางที่ 4.2 ค่า RMSE เฉลี่ยของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กริดของ CODE ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 44
ตารางที่ 4.3 ค่า Correlation เฉลี่ยของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กริดของ CODE ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 45
ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส 4
รูปที่ 2.2 ความถี่ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (https://insidegnss.com/something-old-something-new/) 5
รูปที่ 2.3 การมอดูเลตแบบ BPSK 5
รูปที่ 2.4 Header ของ Observation RINEX 3 7
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการอ่านค่า Header ของระบบ Galileo ใน Observation RINEX 3 8
รูปที่ 2.6 Epoch ของ Observation RINEX 3 8
รูปที่ 2.7 ข้อมูลที่บรรจุใน Observation RINEX 3 9
รูปที่ 2.8 Header ของ Navigation RINEX 3 9
รูปที่ 2.9 ข้อมูลที่บรรจุใน Navigation RINEX 3 10
รูปที่ 2.10 พารามิเตอร์ของ Broadcast Ephemeris 10
รูปที่ 2.11 จำนวนเฟสเริ่มต้นที่ไม่ทราบค่าของสัญญาณ carrier-phase 16
รูปที่ 2.12 เส้นทางการเดินทางของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากดาวเทียมมายังเครื่องรับ (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง 17
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งของเครือข่ายสถานีของ IGS 19
รูปที่ 2.14 ไฟล์ IONEX ของวันที่ 17 สิงหาคม 2563 (DOY 230) 20
รูปที่ 2.15 หน้าเว็ปไซต์ของการให้บริการแบบจำลอง IRI 2016 21
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของกริดที่มีละติจูดตั้งแต่ 0 ถึง 0.7 และลองจิจูด 95 ถึง 95.6 24
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างในวันที่มีความแปรปรวนของสถานี KMIT วันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) (ก) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริงที่คำนวณได้ (ข) ค่า ROTI ของดาวเทียม 27
รูปที่ 3.3 แผนที่ในขณะที่มีความแปรปรวนในวันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) เวลา 14.05 UTC (ก) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (ข) แผนที่ ROTI 28
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่มีความแปรปรวนของสถานี KMIT วันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) โดยมีค่า j เท่ากับ (ก) 10 วินาที (ข) 30 วินาที (ค) 60 วินาที (ง) 300 วินาที 29
รูปที่ 3.5 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในขณะที่มีความแปรปรวนในวันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) เวลา 14.05 UTC โดยมีค่า j เท่ากับ (ก) 10 วินาที (ข) 30 วินาที (ค) 60 วินาที (ง) 300 วินาที 30
รูปที่ 3.6 การสร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 31
รูปที่ 3.7 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 (ก) แนวแกนละติจูด (ข) แนวแกนลองจิจูด 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.8 การกรองค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ 34
รูปที่ 4.1 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่คำนวณจากข้อมูลดาวเทียม (ก) : ระยะทางเทียมจาก code (ข) : ระยะทางเทียมจาก carrier-phase 36
รูปที่ 4.2 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจากระยะทางเทียมของ carrier-phase ที่ปราศจากคลื่นหลุด 37
รูปที่ 4.3 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ปราศจากค่าความกำกวมแล้ว (ก) : แยกระบบ (ข) : รวมทุกระบบ. 38
รูปที่ 4.4 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ปราศจากที่แก้ไบอัสของดาวเทียมแล้ว (ก) : แยกระบบ (ข) : รวมทุกระบบ 38
รูปที่ 4.5 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แก้ไบอัสของเครื่องรับด้วยวิธีหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด 39
รูปที่ 4.6 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP ของสถานี KMIT ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC..... 40
รูปที่ 4.7 smooth TEC จากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC... 40
รูปที่ 4.8 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC 41
รูปที่ 4.9 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (แสดงค่าด้วยความสูงและสี) ในวันที่ 4 มีนาคม ปี 2563 ในเวลา 6.30 UTC (ก) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจาก CODE..... 42
รูปที่ 4.10 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจาก CODE ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC 44
รูปที่ 4.11 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 4 มีนาคม 2563 ที่ตำแหน่งกริด 15 องศาละติจูด และ 100 องศาลองจิจูด..... 46
รูปที่ 4.12 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 4 มีนาคม 2563 ที่ตำแหน่งกริด 15 องศาละติจูด และ 95 องศาลองจิจูด..... 46
รูปที่ 4.13 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 18 มีนาคม 2563 47
รูปที่ 4.14 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 18 มีนาคม 2563..... 48
รูปที่ 4.15 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 18 มีนาคม 2563 เวลา 13.10 – 15.00 UTC ทุก 10 นาที 49
รูปที่ 4.16 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 18 มีนาคม 2563 (ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด..... 50
รูปที่ 4.17 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563 51
รูปที่ 4.18 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563..... 51
รูปที่ 4.19 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563 ทุก 10 นาที..... 53
รูปที่ 4.20 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563 (ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด..... 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.21 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 17 มีนาคม 2564 55
รูปที่ 4.22 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 17 มีนาคม 2564 55
รูปที่ 4.23 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 17 มีนาคม 2564 ทุก 15 นาที 56
รูปที่ 4.24 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 17 มีนาคม 2564 (ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด 57
รูปที่ 4.25 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 25 มีนาคม 2564 58
รูปที่ 4.26 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564 58
รูปที่ 4.27 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564 ทุก 5 นาที 59
รูปที่ 4.28 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564 (ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด 60
รูปที่ 4.29 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 61
รูปที่ 4.30 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564 61
รูปที่ 4.31 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 ทุก 5 นาที 62
รูปที่ 4.32 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 (ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันระบบดาวเทียมนำร่องจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) ได้มีการพัฒนาขึ้นมาหลายระบบ เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งบนพื้นโลก เช่นระบบ Global Positioning System (GPS), GLONASS, Galileo, BeiDou และ QZSS เป็นต้น โดยสัญญาณดาวเทียมจะต้องผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นโลก ทำให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนไป โดยเมื่อสัญญาณผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) ที่มีความสูงจากพื้นโลกตั้งแต่ 50 ถึง 1000 กิโลเมตรสัญญาณจะผิดเพี้ยนไปอันเนื่องจากความผันผวนของชั้นบรรยากาศนี้ โดยที่บริเวณประเทศไทยที่ตั้งอยู่ในเขตละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกจะเป็นพื้นที่ที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความผันผวนมากกว่าเขตละติจูดสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการสังเกตการณ์ค่าความหน่วงเวลาในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่น VHF radar, ionosondes, เครื่องรับจีเอ็นเอสเอส เป็นต้น เพื่อเป็นการศึกษาลักษณะและผลกระทบที่เกิดในชั้นบรรยากาศนี้ โดยหนึ่งในวิธีที่ใช้ในการสังเกตการณ์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (Total electron content: TEC) ที่สามารถคำนวณได้ด้วยเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสองความถี่ที่เป็นอุปกรณ์ระดับงานวิจัย โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการพัฒนาการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ในระบบ GPS, Galileo และ BeiDou จากรูปแบบข้อมูล Receiver INdependent Exchange (RINEX) เวอร์ชัน 3 แทนที่การคำนวณด้วยสัญญาณ GPS (จาก RINEX 2) เพียงระบบเดียวและสามารถสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสำหรับการบ่งชี้คุณลักษณะของชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ โดยการที่ทราบถึงความผันผวนของชั้นบรรยากาศนี้ไม่เพียงแต่มีความสำคัญสำหรับการวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์แต่ยังช่วยเพิ่มความแม่นยำของการใช้งานด้านอวกาศ ยกตัวอย่างเช่น การนำทางด้วยดาวเทียม การปักหมุดพื้นที่ด้วยการระบุพิกัดแบบแม่นยำสูง (Precise Point Positioning, PPP) และระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติในอนาคต

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่มีความผันผวนและได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ต่างๆ ทั้งเหตุการณ์จากธรรมชาติ เช่น ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมา (Equatorial Plasma Bubble: EPB) [1], แผ่นดินไหว [2] และเหตุการณ์อื่นๆ เช่นการยิงจรวด SpaceX Falcon Heavy [3] ซึ่งงานวิจัย [1, 2, 3] ได้นำเสนอเหตุการณ์ผิดปกติด้วยแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแบบสองมิติ โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสองความถี่กว่า 220 , 1300 (จาก GNSS Earth Observation Network System), 2200 (จาก Scripps Orbit and Permanent Array Center) ตามลำดับ การที่เราจะทราบถึงเหตุการณ์ที่ชั้นบรรยากาศผิดปกติเหล่านี้ได้นั้นจำเป็นต้องใช้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริงที่เครื่องรับวัดได้มาคำนวณ เนื่องจากค่าจากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองนั้นไม่อาจแสดงถึงความผิดปกติได้อย่างชัดเจนเท่ากับค่าจริง อีกทั้งด้วยการสร้างแผนที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนสุทธิแบบกึ่งเรียลไทม์นั้นเป็นไปได้ยาก อันเกิดจากการคำนวณข้อมูลจากสถานีจำนวนมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นี้แบบกึ่งเรียลไทม์ด้วย Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ โดยคำนวณจากข้อมูลจริงจากสถานีจีเอ็นเอสเอสจำนวน 19 สถานีบริเวณประเทศไทย ประกอบด้วยสถานีจากกรมโยธาธิการและผังเมือง (Department of Public Works and Town & Country Planning) จำนวน 15 สถานี และจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 4 สถานี โดยที่แต่ละสถานีจะส่งข้อมูลแบบกึ่งเรียลไทม์ทุกๆ 15 - 60 นาที

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาลักษณะและพฤติกรรมของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยวิธีการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

2. เพื่อนำเสนอวิธีใหม่ในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิให้ครอบคลุมทั้งประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลสัญญาณ GPS

3. เพื่อพัฒนาซอฟต์แวร์ในการอ่านพารามิเตอร์แบบกึ่งเรียลไทม์ในระบบจีเอ็นเอสเอสจากรูปแบบข้อมูล RINEX 3 แทนที่สัญญาณ GPS จาก RINEX 2 เพียงระบบเดียว

4. เพื่อนำเสนอวิธีใหม่ในการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์จากแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ, แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และเทคนิค Keogram แบบกึ่งเรียลไทม์ด้วยสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ตำแหน่งบริเวณประเทศไทยและโดยรอบในช่วงละติจูดที่ 0 ถึง 25 องศาเหนือและช่วงลองจิจูดที่ 95 ถึง 110 องศาตะวันออก โดยในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิด้วยเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline นั้นจะใช้สัญญาณ GPS และขยายผลการวิจัยเป็นการวิเคราะห์เหตุการณ์ผิดปกติแบบกึ่งเรียลไทม์ด้วยเทคนิคการสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และเทคนิค Keogram โดยใช้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสอันประกอบไปด้วยระบบ GPS, Galileo และ BeiDou จากสถานีหลัก 19 สถานีบริเวณประเทศไทยในปี พ.ศ. 2563 - 2564 และได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการอ่านพารามิเตอร์ในระบบจีเอ็นเอสเอสจากรูปแบบข้อมูล RINEX 3 เวอร์ชัน 3.02 และ 3.04 โดยใช้โปรแกรมแมทแลป (Matlab) ในการอ่านและประมวลผลข้อมูลแบบกึ่งเรียลไทม์ ซึ่งทำให้ได้จำนวนของดาวเทียมที่เพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงแค่ระบบ GPS ระบบเดียว เพื่อให้สามารถระบุเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ได้ด้วยข้อมูลที่เพิ่มขึ้นจากระบบดาวเทียมอื่น และศึกษาในวันที่เกิดเหตุการณ์ผิดปกติที่สามารถระบุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 หัวข้อของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกแบ่งออกเป็น 5 บท

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญรวมถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส และข้อมูลจีเอ็นเอสเอสในรูปแบบไฟล์ RINEX 3 รวมถึงการคำนวณค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ด้วยค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากข้อมูล RINEX 3 ที่รับได้และค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากแบบจำลองสากล

บทที่ 3 กล่าวถึงแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสองมิติและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง รวมถึงผลกระทบเมื่อมีเหตุการณ์ผิดปกติ มีการนำเสนอเทคนิคในการสังเกตการณ์ค่าแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแบบกึ่งเรียลไทม์ด้วยเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline ด้วยระบบดาวเทียม GPS ร่วมกันกับการใช้เทคนิค Keogram ในการระบุถึงความผิดปกติของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

บทที่ 4 กล่าวถึงผลลัพธ์ของการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ครอบคลุมบริเวณประเทศไทยทั้งหมดด้วยเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline ด้วยระบบดาวเทียม GPS และผลลัพธ์ในการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและ Keogram ที่นำเสนอ

บทที่ 5 กล่าวสรุปถึงผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

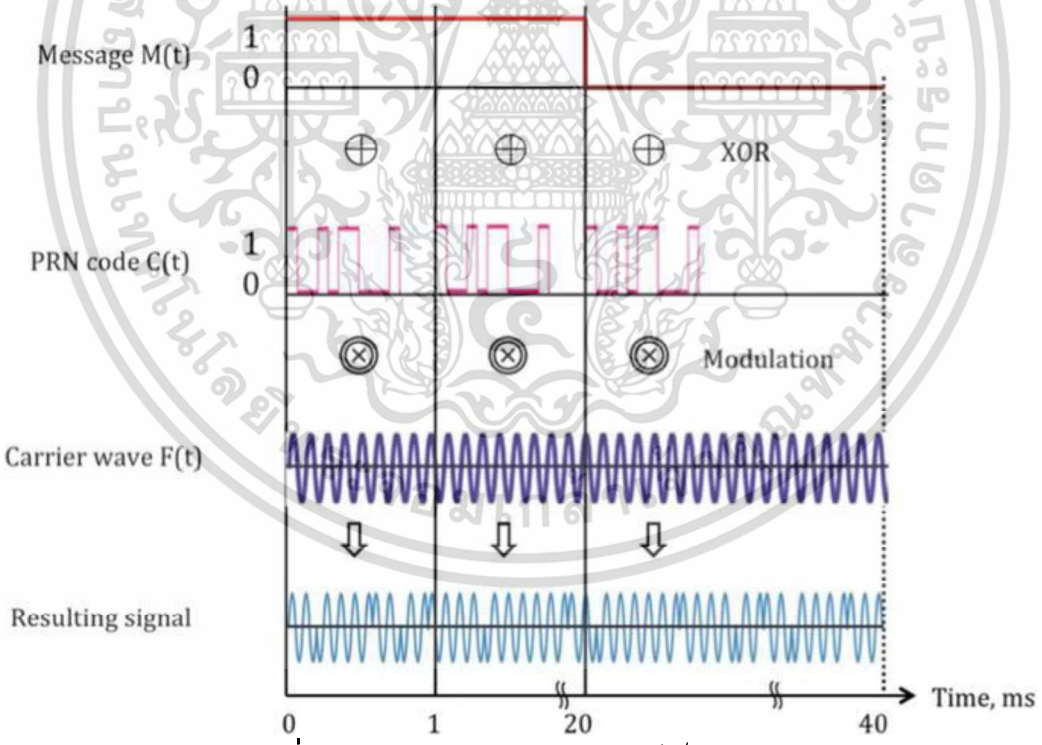
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับข้อมูลระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ดาวเทียมระบบ GPS, Galileo และ BeiDou ที่เป็นวงโคจรระดับกลาง (Medium Earth Orbit: MEO) เป็นหลัก รวมถึงพารามิเตอร์สัญญาณดาวเทียมและข้อมูลจากดาวเทียม ที่แตกต่างกันในดาวเทียมแต่ละระบบ ที่จำเป็นต่อการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ การคำนวณตำแหน่งดาวเทียม และการคำนวณตำแหน่งเครื่องรับ เพื่อสร้างความเข้าใจพื้นฐานไปสู่การอธิบายถึงวิธีการอ่านค่าข้อมูลดาวเทียมสากลในรูปแบบ Receiver INdependent Exchange 3 ซึ่งเป็นข้อมูลจีเอ็นเอสเอส ที่ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในประเทศไทย

2.1 สัญญาณจีเอ็นเอสเอส

การส่งสัญญาณดิจิทัลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสผ่านคลื่นความถี่วิทยุสัญญาณจะประกอบไปด้วยความถี่ของสัญญาณพาห์ (Carrier frequency), สัญญาณ code และข้อมูลนำร่อง (Navigation data) [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.1

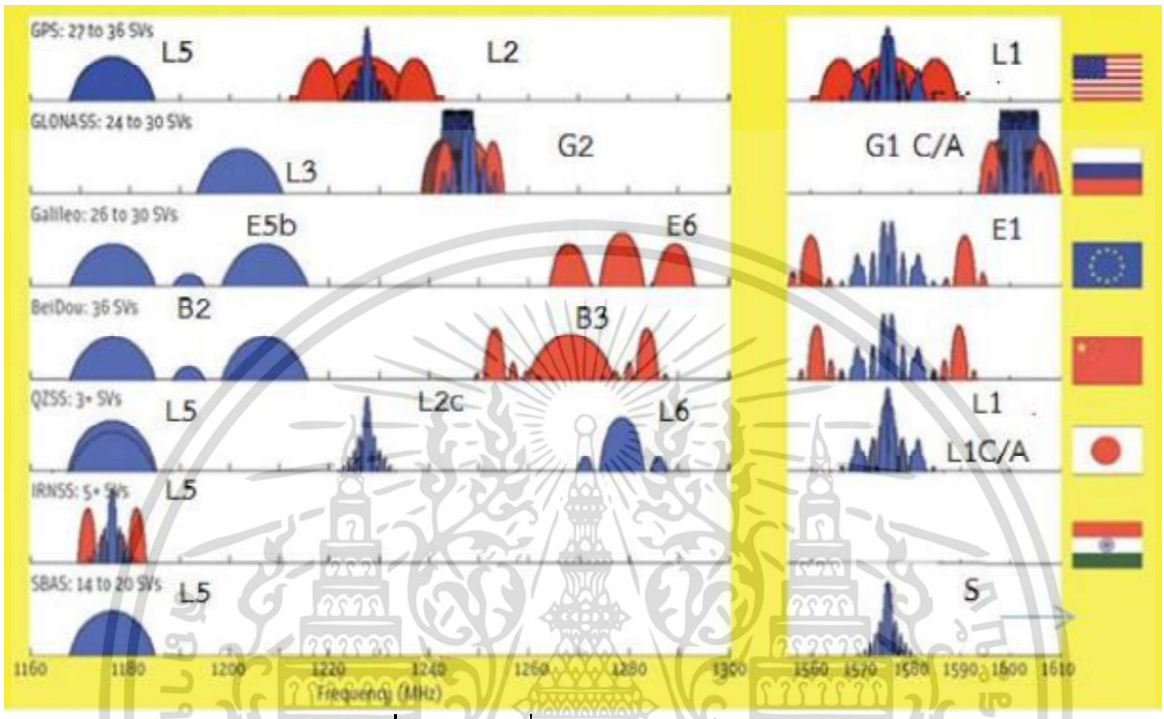


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

(Malek K. Real-Time Cycle-Slip Detection and Correction for Land Vehicle Navigation Using Inertial Aiding [Thesis]. Kingston: Queen's University; 2013)

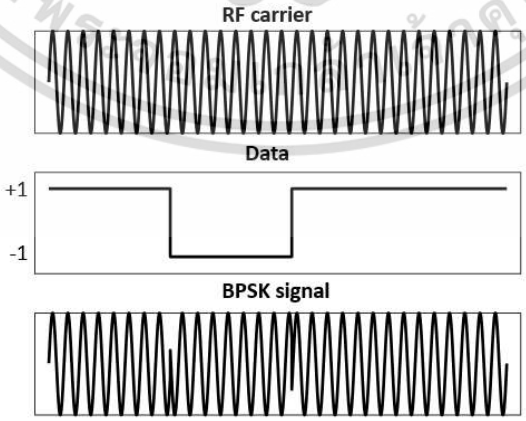
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้วดาวเทียมหนึ่งดวงจะส่งสัญญาณหลายชนิดพร้อมกัน เช่นสัญญาณ GPS ที่ส่งสัญญาณพร้อมกันถึง 8 ชนิด (L1C / A, L1C, L2C, L5, L1P (Y), L1M, L2P (Y), L2M) ในย่านความถี่ L1, L2 และ L5 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความถี่ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส
(https://insidegnss.com/something-old-something-new/)

จากรูปที่ 2.2 ในการส่งสัญญาณนั้นจะใช้การมอดูเลตเฟส (Phase modulation) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูล โดยที่การมอดูเลตที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส คือ binary phase shift keying (BPSK) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่สัญญาณใหม่บางชนิดก็จะใช้การมอดูเลตแบบ binary offset carrier (BOC)



รูปที่ 2.3 การมอดูเลตแบบ BPSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 มาตรฐานข้อมูล Receiver INdependent Exchange (RINEX)

RINEX เป็นไฟล์ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสตามมาตรฐานสากลของ International GNSS Service (IGS) ที่อยู่ในรูปไฟล์ข้อความเพื่อให้สามารถประมวลผลสัญญาณได้ เช่น ใช้เพื่อวัดคุณภาพของสัญญาณจีเอ็นเอสเอส หรือใช้ในการประเมินสภาพความแปรปรวนบนชั้นอวกาศเป็นต้น โดยที่ไฟล์ RINEX 2 จะเก็บเฉพาะข้อมูลของระบบดาวเทียมเพียงระบบเดียว หากต้องการข้อมูลของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสจะต้องใช้ไฟล์ RINEX 3 ขึ้นไป

2.2.1 ความแตกต่างของเวลาในสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแต่ละระบบในไฟล์ RINEX

ในไฟล์ RINEX จะบันทึกสัญญาณจีเอ็นเอสเอสซึ่งประกอบไปด้วยระบบ GPS (RINEX จะเรียกว่า G), GLONASS (RINEX จะเรียกว่า R), SBAS payload (RINEX จะเรียกว่า S), Galileo (RINEX จะเรียกว่า E), BeiDou (RINEX จะเรียกว่า C), QZSS (RINEX จะเรียกว่า J) และ IRNSS (RINEX จะเรียกว่า I) ซึ่งที่เครื่องรับนั้นจะได้รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในแต่ละระบบพร้อมๆกัน แต่ที่ดาวเทียมนั้นจะมีค่าสัญญาณนาฬิกาที่หน่วงเวลากันในแต่ละระบบอยู่ ซึ่งสามารถสรุปค่าสัญญาณนาฬิกาที่หน่วงเวลากันของดาวเทียมแต่ละระบบกับเวลา Coordinated Universal Time (UTC) ใน RINEX 3 ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความสัมพันธ์ของเวลาดาวเทียมแต่ละระบบใน RINEX 3

GPS = Galileo = QZSS = IRNSS	=	UTC + ΔtLS
GLONASS	=	UTC - ΔtLS
BeiDou	=	UTC + ΔtLS$_{BDS}$

โดยที่ ΔtLS หมายถึงค่าเวลาเหลื่อม (Leap second) ของเวลาในระบบ GPS กับ UTC ซึ่งจะมีค่าน้อยกว่า 1 ไมโครวินาทีในปี 1980 และมีค่าเพิ่มขึ้น โดยในปัจจุบันในปี 2560 – 2564 มีค่า 18 วินาที และ ΔtLS$_{BDS}$ หมายถึงค่าเวลาเหลื่อมในระบบ BeiDou กับ UTC โดยในปัจจุบันในปี 2560 – 2564 มีค่า 4 วินาที ซึ่งในการคำนวณค่าจากสัญญาณจีเอ็นเอสเอสนั้น จำเป็นต้องทำให้ทุกสัญญาณอยู่ในระบบเวลาเดียวกัน

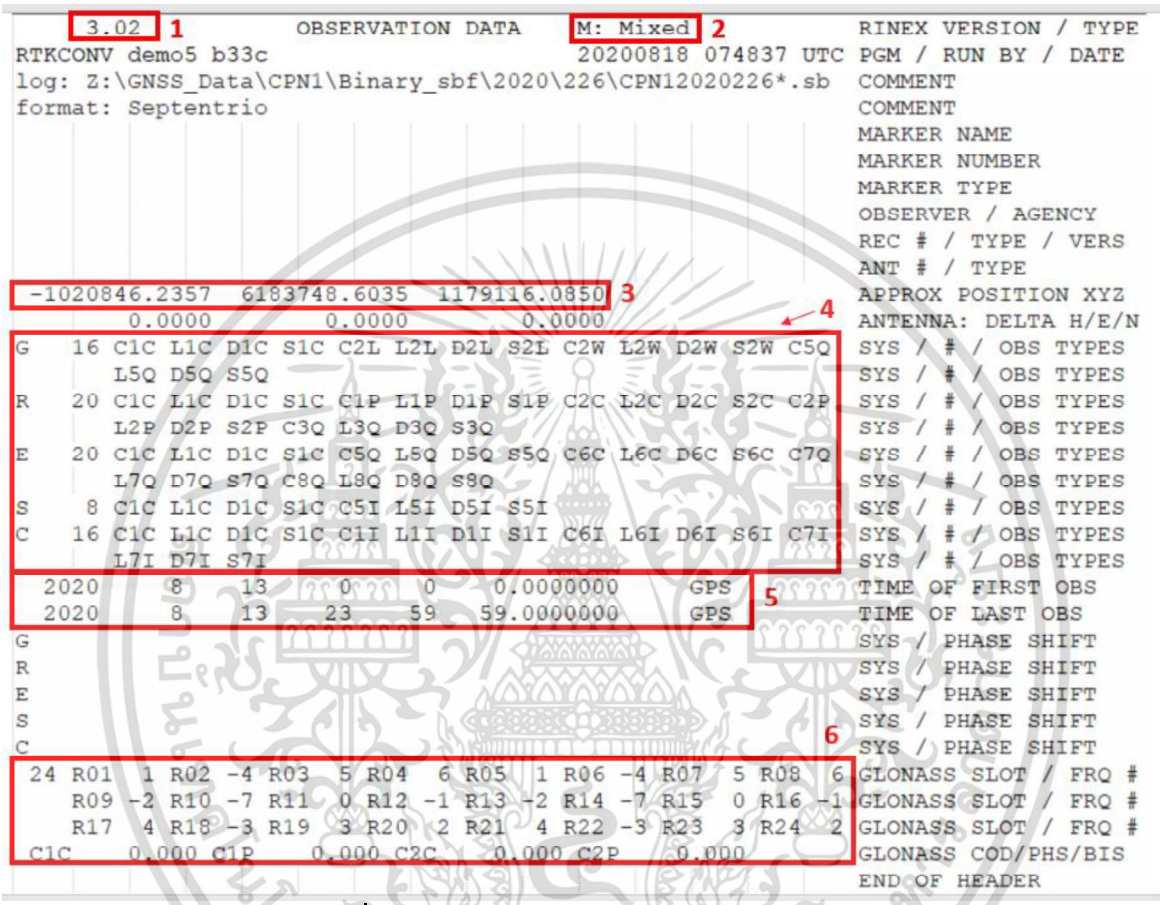
โดยทั่วไปจะแบ่งไฟล์ RINEX ออกเป็นสองชนิด ได้แก่ Observation RINEX (บันทึกสัญญาณ) และ Navigation RINEX (บันทึกข้อมูลวงโคจรของดาวเทียม) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ RINEX 3 และจำเป็นต้องศึกษาคู่มือการใช้งาน [5]

2.2.2 ไฟล์ Observation RINEX

เป็นไฟล์ที่บันทึกค่าข้อมูลจากความถี่ของสัญญาณพาห์ (Carrier frequency) และสัญญาณ code ที่รับได้จากดาวเทียมแต่ละดวงประกอบด้วย ค่าระยะทางเทียม (Pseudorange), จำนวนลูกคลื่นพาห์ (Carrier-phase), ดอปเปลอร์ (Doppler) และความแรงของสัญญาณ (Signal strength) ของสัญญาณแต่ละชนิด ซึ่งในแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละระบบดาวเทียมนั้นจะมีการกำหนดชื่อชนิดของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในความถี่เดียวกันให้เป็นรูปแบบเดียวกัน โดยที่ไฟล์ Observation RINEX 3 แบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ Header, Epoch และส่วนข้อมูลสัญญาณ โดยในการใช้งานนั้นจะต้องทำการอ่านค่า Header ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และนำค่าที่อ่านได้นั้นมาเทียบกับ [5] ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 Header ของ Observation RINEX 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GNSS System	Freq. Band /Frequency	Channel or Code	Observation Codes			
			Pseudo Range	Carrier Phase	Doppler	Signal Strength
Galileo	E1 / 1575.42	A PRS	C1A	L1A	D1A	S1A
		B I/NAV OS/CS/SoL	C1B	L1B	D1B	S1B
		C no data	C1C	L1C	D1C	S1C
		B+C	C1X	L1X	D1X	S1X
		A+B+C	C1Z	L1Z	D1Z	S1Z
	E5a / 1176.45	I F/NAV OS	C5I	L5I	D5I	S5I
		Q no data	C5Q	L5Q	D5Q	S5Q
		I+Q	C5X	L5X	D5X	S5X
	E5b / 1207.140	I I/NAV OS/CS/SoL	C7I	L7I	D7I	S7I
		Q no data	C7Q	L7Q	D7Q	S7Q
		I+Q	C7X	L7X	D7X	S7X
	E5(E5a+E5b) / 1191.795	I	C8I	L8I	D8I	S8I
		Q	C8Q	L8Q	D8Q	S8Q
		I+Q	C8X	L8X	D8X	S8X
	E6 / 1278.75	A PRS	C6A	L6A	D6A	S6A
		B C/NAV CS	C6B	L6B	D6B	S6B
		C no data	C6C	L6C	D6C	S6C
		B+C	C6X	L6X	D6X	S6X
		A+B+C	C6Z	L6Z	D6Z	S6Z

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการอ่านค่า Header ของระบบ Galileo ใน Observation RINEX 3 [5]

จากรูปที่ 2.4 ใน Header ของ Observation RINEX 3 แต่ละส่วนจะประกอบไปด้วย

1. แสดงเวอร์ชั่นของ RINEX
2. แสดงสถานะของ RINEX ว่าเก็บข้อมูลระบบดาวเทียม: ถ้าแบบรวมทุกระบบจะขึ้นว่า M:MIXED ถ้าระบบเดียวจะขึ้นว่า G:GPS หรือ R:GLONASS เป็นต้น
3. ค่าตำแหน่ง XYZ ของเครื่องรับ
4. ระบบ จำนวน และชนิดของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับ: โดยการอ่านจะต้องนำชื่อสัญญาณที่ปรากฏมาเปรียบเทียบ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5 มาตรฐาน RINEX จะเรียกสัญญาณ carrier-phase ที่ความถี่ E5b (1207.14 MHz) ในช่องสัญญาณ Q ของระบบ Galileo ว่า L7Q
5. ช่วงเวลาของข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่จัดเก็บ: ปี เดือน วัน ชั่วโมง นาที วินาที ตามลำดับ
6. ช่อง Glonass Slot และไบอัสเฟสของระบบ Glonass

ถัดจากส่วน Header จะเป็นส่วนของ Epoch ที่จะแสดงถึงเวลาที่เครื่องรับสามารถรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสมาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.6

```
> 2020  7  7  0  0  0.0000000  0 45
```

รูปที่ 2.6 Epoch ของ Observation RINEX 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 Epoch จะแสดง ปี เดือน วัน ชั่วโมง นาที วินาที flag (เป็น 0 หมายถึงปกติ) และจำนวนดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่พบ (ในที่นี้คือพบ 45 ดวง ณ วันที่ 7/7/2563 เวลา 0.00 UTC)

ถัดจากส่วน Epoch จะเป็นส่วนข้อมูลสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

```
G22  24444988.866  128459279.206    229.684   39.000                                                  24444985.542
G30  24535063.216  128932628.332   3198.305   37.000  24535065.253  100466990.286   2492.183  41.000  24535065.163
R 3  22698796.099  121508420.453  -2315.522   43.000  22698795.885   94506541.290  -1800.964  43.000  22698795.921
R 4  22894995.756  122601651.903   -940.735   40.000  22894995.112   95356031.965   -731.686  42.000  22894995.112
R13  21774032.544  116272102.932    750.978   35.000  21774034.241   90433857.949    584.095  38.000  21774034.259
R14  22264659.002  118683143.028   2143.721   44.000  22264661.325   92309116.460   1667.337  41.000  22264661.342
R17  19466902.252  104171317.081   1868.252   54.000  19466902.323   81022129.865   1453.086  51.000  19466902.252
R18  23050417.712  123044691.015   4215.603   42.000  23050419.820   95701436.966   3278.799  42.000  23050420.035
R23  22910943.537  122558079.065  -4021.804   40.000  22910945.824   95322951.416  -3128.072  37.000  22910946.825
R24  20038477.492  107154734.212  -2187.740   53.000  20038478.028   83342566.646  -1701.577  49.000  20038478.028
E 2  25877124.816  135985194.757    774.918   45.000  25877127.121  101547385.686    578.472  45.000  25877125.745
```

รูปที่ 2.7 ข้อมูลที่บรรจุใน Observation RINEX 3

จากรูปที่ 2.7 จะประกอบไปด้วยข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ซึ่งแต่แถวจะเป็นค่าสัญญาณของดาวเทียมแต่ละดวง และแต่ละคอลัมน์คือค่าตามชนิดของข้อมูลที่รับได้ใน Header

2.2.3 ไฟล์ Navigation RINEX

เป็นไฟล์ที่บันทึกสัญญาณข้อมูลนำร่องดาวเทียม (Navigation message) ซึ่งจะบ่งบอกถึงลักษณะของดาวเทียม และใช้เพื่อคำนวณหาตำแหน่งดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสนใจเฉพาะดาวเทียมวงโคจรระดับกลาง ลักษณะของ Navigation RINEX จะประกอบด้วยส่วนของ Header และส่วนของข้อมูลของดาวเทียมดังแสดงในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9

```
     3.02           N: GNSS NAV DATA     M: Mixed            RINEX VERSION / TYPE
CONVBIN 2.4.3 demo5                      20200813 000132 UTC PGM / RUN BY / DATE
log: /home/cssrg/Minentrip/Binaryfile/2020/RMITL_225.gps     COMMENT
format: NovAtel OEM6                                         COMMENT
GPSA   4.6566E-09   1.4901E-08  -5.9605E-08  -1.1921E-07      IONOSPHERIC CORR
GPSB   7.7824E+04   4.9152E+04  -6.5536E+04  -2.6214E+05      IONOSPHERIC CORR
GAL    0.0000E+00   0.0000E+00   0.0000E+00   0.0000E+00      IONOSPHERIC CORR
QZSA   0.0000E+00   0.0000E+00   0.0000E+00   0.0000E+00      IONOSPHERIC CORR
QZSB   0.0000E+00   0.0000E+00   0.0000E+00   0.0000E+00      IONOSPHERIC CORR
GPUT -4.6566128731E-09-1.0658141041E-14 589824 2119          TIME SYSTEM CORR
GAUT  0.0000000000E+00 0.0000000000E+00    0    0           TIME SYSTEM CORR
QZUT  0.0000000000E+00 0.0000000000E+00    0    0           TIME SYSTEM CORR
BDUT  0.0000000000E+00 0.0000000000E+00    0    0           TIME SYSTEM CORR
    18                                                       LEAP SECONDS
                                                             END OF HEADER
```

รูปที่ 2.8 Header ของ Navigation RINEX 3

จากรูปที่ 2.8 ใน Header ของ Navigation RINEX 3 แต่ละส่วนจะประกอบไปด้วย

1. แสดงเวอร์ชั่นของ RINEX
2. แสดงค่า Ionospheric correction parameters ของดาวเทียมแต่ละระบบ
3. แสดงค่าผลต่างเวลาในระบบจีเอ็นเอสเอสนั้นๆ เทียบกับเวลา UTC (ค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามเชิงเส้น)
4. แสดงค่าเหลื่อมเวลาของระบบ GPS กับเวลา UTC (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

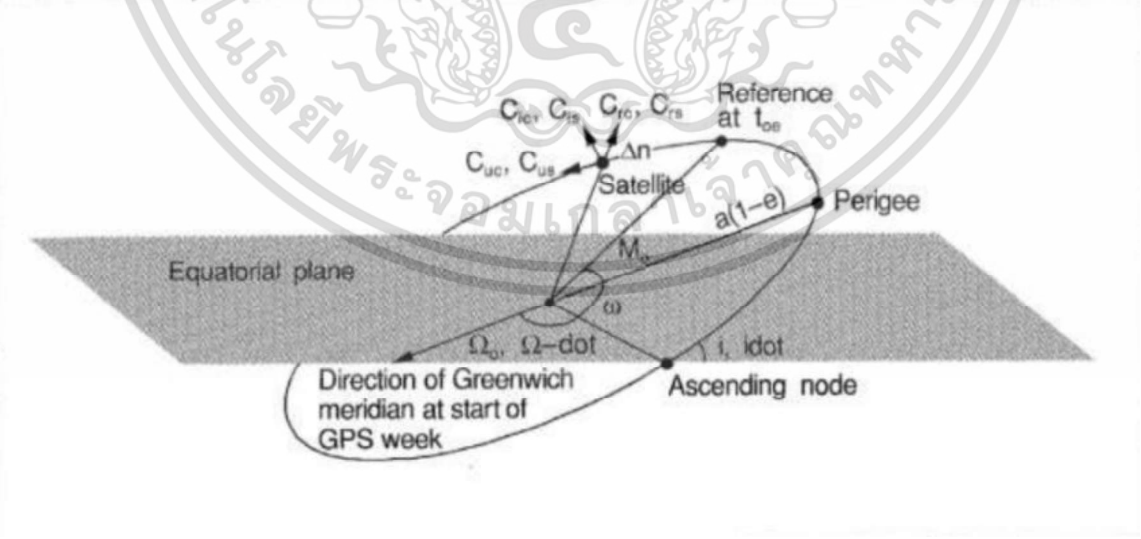
ถัดจากส่วน Header จะเป็นส่วนของ Epoch และชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งของดาวเทียม ดังรูปที่ 2.9

```
C12 2020  4  6 12  0  0  .344911357388E-03  .739852623610E-11  .000000000000E+00
     .220000000000E+02  .757031250000E+02  .285619040037E-08  .299585807555E+01
     .382307916880E-05  .108520966023E-02  .140904448926E-04  .528262422943E+04
     .129600000000E+06 -.265426933765E-07 -.304246476717E+01  .204890966415E-07
     .988974171384E+00  .899531250000E+02 -.191530942074E+01 -.630454832403E-08
     .347514475373E-09  .000000000000E+00  .744000000000E+03  .000000000000E+00
     .200000000000E+01  .000000000000E+00  .220000000000E-08 -.500000000000E-09
     .129600000000E+06  .000000000000E+00
E25 2020  4  6 11 40  0 -.508624478243E-03 -.582645043323E-12  .000000000000E+00
     .860000000000E+02 -.387500000000E+02  .351050336941E-08  .231685502407E+01
    -.199116766453E-05  .628349371254E-04  .167451798916E-05  .544060176849E+04
     .128400000000E+06  .931322574615E-08  .157241175847E+01  .372529029846E-07
     .982564052034E+00  .314906250000E+03  .187484655203E-01 -.601775066347E-08
    -.374658463172E-09  .100000000000E+01  .210000000000E+04  .000000000000E+00
     .312000000000E+01  .000000000000E+00  .139698386192E-08  .162981450558E-08
     .129634000000E+06  .000000000000E+00
```

รูปที่ 2.9 ข้อมูลที่บรรจุใน Navigation RINEX 3

2.2.4 การคำนวณตำแหน่งดาวเทียมจากไฟล์ Navigation RINEX

จากรูปที่ 2.9 แสดงชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งดาวเทียม โดยที่สำหรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสวงโคจรระดับกลางเฟรมข้อมูลจะประกอบด้วยข้อมูลหลักๆ 4 ส่วนคือวันที่และเวลา ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งดาวเทียม (Almanac) ค่าพารามิเตอร์แสดงลักษณะของวงโคจรดาวเทียม (Ephemeris) และค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากอุปกรณ์ดาวเทียม (Satellite clock bias) โดยข้อมูลเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการคำนวณตำแหน่งดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสได้ โดยที่จะต้องดึงพารามิเตอร์ที่ใช้ออกมาจากไฟล์ RINEX สามารถสรุปพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.10 และตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.10 พารามิเตอร์ของ Broadcast Ephemeris

(Langley, 1991)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของข้อมูลจีเอ็นเอสเอสวงโคจรระดับกลาง

ลำดับ	ค่าพารามิเตอร์	คำอธิบาย
1	t_e	เวลาของดาวเทียม (Time of ephemeris)
2	$\sqrt{a}$	รากที่สองของค่ากึ่งแกนเอก (Square root of semimajor axis)
3	e	ค่าความผิดปกติ (Eccentricity)
4	i_0	มุมเอียงที่เวลาดาวเทียม (Inclination angle)
5	Ω_0	ขนาดที่ถูกต้องของมุมเริ่มต้น (Right ascension of ascending node)
6	ω	รัศมีของวงโคจรเริ่มต้น (Argument of perigee)
7	M_0	ค่าความผิดปกติเริ่มต้น (Mean anomaly 0)
8	di/dt	อัตราของการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียง (Inclination angle)
9	$\dot{\Omega}$	ขนาดที่ถูกต้องของมุมเริ่มต้น (Right ascension of ascending node)
10	Δn	อัตราการหมุนเฉลี่ยของดาวเทียม (mean motion rate)
11	C_{uc}	ค่าแอมพลิจูดของค่าโคไซน์แก้ไขละติจูด (Amplitude of cosine latitude correction)
12	C_{us}	ค่าแอมพลิจูดของค่าไซน์แก้ไขละติจูด (Amplitude of sine latitude correction)
13	C_{rc}	ค่าแอมพลิจูดของค่าโคไซน์รัศมีวงโคจร (Amplitude of cosine orbital correction)
14	C_{rs}	ค่าแอมพลิจูดของค่าไซน์รัศมีวงโคจร (Amplitude of sine orbital radius correction)
15	C_{ic}	ค่าแอมพลิจูดของค่าโคไซน์เอียงดาวเทียม (Amplitude of cosine inclination angle)
16	C_{is}	ค่าแอมพลิจูดของค่าไซน์เอียงดาวเทียม (Amplitude of sine inclination angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ในลำดับที่ 1 - 7 จะเป็นค่าในแต่ละเวลาของดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสวงโคจรระดับกลาง โดยเรียกว่าค่าพารามิเตอร์วงโคจรเคปเลอร์ (Kepler orbital) โดยที่ดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสที่ ระดับวงโคจรอื่นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างจากนี้ และค่าพารามิเตอร์ในลำดับที่ 8 - 16 จะเป็นค่าแก้ไขของค่าพารามิเตอร์เคปเลอร์ แต่ละเฟรมจะมีข้อมูลเวลาและค่าพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะของวงโคจรดาวเทียมที่เหมือนกันในแต่ละดาวเทียม แต่ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งดาวเทียมจะแตกต่างกันไปตามแต่ละดาวเทียม จากค่าข้อมูลพารามิเตอร์ที่ได้รับสามารถนำไปคำนวณค่าการเคลื่อนที่ และตำแหน่งของดาวเทียมได้ดังนี้

1. ค่ากึ่งแกนเอก a (Semimajor Axis)
2. ค่าแก้การหมุนเฉลี่ย (Corrected mean motion) โดยที่ $\mu = 398,600.5\times10^{8}\ m^3/s^2$

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} + \Delta n$$

3. ช่วงเวลาที่เครื่องรับที่นำหน้าเวลา Time of ephemeris ของดาวเทียม

$$t_k = t - t_e$$

4. ค่าความผิดปกติเฉลี่ย (Mean anomaly)

$$M_k = M_0 + n(t_k)$$

5. ค่าความผิดปกติ (Eccentric anomaly)

$$M_k = E_k - e\sin E_k$$

6. ค่าความผิดปกติจริง (True anomaly)

$$\sin v_k = \frac{\sqrt{1-e^2}\,\sin E_k}{1-e\cos E_k}$$

$$\cos v_k = \frac{\cos E_k - e}{1-e\cos E_k}$$

7. ระยะมุมละติจูด (Argument of latitude)

$$\phi_k = v_k + \omega$$

8. ค่าแก้ไขระยะมุมละติจูด (Argument of latitude correction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\delta\phi_k = C_{us}\sin(2\phi_k) + C_{uc}\cos(2\phi_k)$$

9. ค่าแก้ไขรัศมี (Radius correction)

$$\delta r_k = C_{rs}\sin(2\phi_k) + C_{rc}\cos(2\phi_k)$$

10. ค่าแก้ไขความเอียง (Inclination correction)

$$\delta i_k = C_{is}\sin(2\phi_k) + C_{ic}\cos(2\phi_k)$$

11. ระยะมุมละติจูดที่ผ่านการแก้ไข (Corrected argument of latitude)

$$u_k = \phi_k + \delta\phi_k$$

12. รัศมีที่ผ่านการแก้ไข (Corrected radius)

$$r_k = a\left(1 - e\cos E_k\right) + \delta r_k$$

13. ความเอียงที่ผ่านการแก้ไข (Corrected inclination)

$$i_k = i_0 + \left(di/dt\right)t_k + \delta i_k$$

14. ค่าลองจิจูดที่ผ่านการแก้ไข (Corrected longitude of node)

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_k)(t_k) - \dot{\Omega}_e t_{0e}$$

15. ค่าแกน x แกน y (Corrected inclination)

$$x_p = r_k\cos u_k$$

$$y_p = r_k\sin u_k$$

16. ค่าตำแหน่งดาวเทียม (ECEF satellite position)

$$x^j = x_p\cos\Omega_k - y_p\cos i_k\sin\Omega_k$$

$$y^j = x_p\sin\Omega_k + y_p\cos i_k\cos\Omega_k$$

$$z^j = y_s\sin i_k$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การคำนวณค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric delay)

เนื่องจากการคำนวณระยะทางเทียมระหว่างเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสและดาวเทียมแต่ละดวงจะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการส่งและรับสัญญาณ ค่าความหน่วงเวลาที่ได้รับสัญญาณที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในแต่ละความถี่ของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจะมีค่าหน่วงเวลาที่ไม่เท่ากัน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ จะใช้ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแทนค่า 10^{16} อิเล็กตรอนต่อ 1 ตารางเมตร (TECu) ค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ต่อค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและความถี่มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_{iono} = \frac{40.3}{f^2} TEC \tag{2.1}$$

โดย T_{iono} คือค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ f คือความถี่ที่ใช้ในการส่งสัญญาณ เนื่องจากค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ในแต่ความถี่มีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงใช้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงถึงค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในทุกความถี่ โดยในสมการที่ (2.1) จะเป็นการอธิบายถึงผลกระทบของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิโดยใน 1 TECu จะหน่วงเวลาของสัญญาณในแต่ละความถี่ที่ไม่เท่ากัน ยกตัวอย่างเช่น 1 TECu ที่ความถี่ L1 (1.57542 GHz) และความถี่ L2 (1.22760 GHz) จะมีผลต่อระยะทางเทียม 16 และ 27 เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อเครื่องรับได้รับข้อมูลจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส จะสามารถนำช่วงเวลาที่สัญญาณเดินทางไปคำนวณระยะทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ โดยเครื่องรับชนิด 2 ความถี่จะสามารถนำระยะทางเทียมจากทั้ง 2 ความถี่มาคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สามารถนำไปคำนวณค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ ความสัมพันธ์ของระยะทางเทียมที่คำนวณจากนับคำรหัสของข้อมูลสัญญาณ (Code pseudorange) กับค่าความผิดพลาดต่าง ๆ ในความถี่ที่ 1 คือ

$$P_1 = \rho + d_{iono,f1} + c\left(b_{P1}^{r} + b_{P1}^{s}\right) + \varepsilon_{P1} \tag{2.2}$$

และในความถี่ที่ 2

$$P_2 = \rho + d_{iono,f2} + c\left(b_{P2}^{r} + b_{P2}^{s}\right) + \varepsilon_{P2} \tag{2.3}$$

และความสัมพันธ์ของระยะทางเทียมที่คำนวณจากวัดระยะเฟสของความถี่คลื่นพาห์ (Carrier-phase pseudorange) กับค่าความผิดพลาดต่างๆ ในความถี่ที่ 1 คือ

$$L_1 = \rho - d_{iono,f1} + \lambda_1 n_1 + \varepsilon_{L1} \tag{2.4}$$

และในความถี่ที่ 2

$$L_2 = \rho - d_{iono,f1} + \lambda_2 n_2 + \varepsilon_{L2} \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$P_{1,2}$ คือระยะทางเทียมจากสัญญาณ Code (m) ของความถี่ที่ 1 และ 2

$L_{1,2}$ คือระยะทางเทียมจากสัญญาณ Carrier-phase (m) ของความถี่ที่ 1 และ 2

ρ คือ ระยะทางจริง (m)

$d_{iono,f1}$, $d_{iono,f2}$ คือ ค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์ความถี่ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (m)

b^s , b^r คือ ค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากดาวเทียม และเครื่องรับ (s) ตามลำดับ

c คือ ความเร็วแสง 299,792,458 m/s

λ คือ เฟสของความถี่ (m)

n คือ ค่าความกำกวมที่เป็นจำนวนเต็ม (integer ambiguity)

ε คือ สัญญาณรบกวนอื่น ๆ และสัญญาณสะท้อน (m)

ในการคำนวณค่าหน่วงเวลาไอโอโนสเฟียร์จะใช้ผลรวมเชิงเส้น (Linear combination) ระหว่างระยะทางเทียมทั้ง 2 ความถี่ โดยนำสมการที่ (2.3) ลบกับ สมการที่ (2.2) แสดงได้ดังนี้

$$P_2 - P_1 = T_{iono,f2} - T_{iono,f1} + \left[c\left(b^r_{P2} + b^s_{P2}\right) - c\left(b^r_{P1} + b^s_{P1}\right)\right] + \varepsilon_{P3}$$

จัดรูป และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ในสมการที่ (2.1) ได้ดังนี้

$$STEC_P = K(P_2 - P_1) + STEC_{hw} + STEC_{noise} \tag{2.6}$$

โดยที่ $STEC_P$ คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียง (Slant TEC: STEC) ที่คำนวณมาจากผลรวมเชิงเส้นของ code pseudorange, TEC_{hw} คือค่าควา มผิดพลาดในหน่วย TECu ที่เกิดจากฮาร์ดแวร์หรือไบอัสของฮาร์ดแวร์ (Hardware biases), TEC_{noise} คือค่าความผิดพลาดในหน่วย TECu ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน สัญญาณสะท้อน และสัญญาณอื่นๆ และ K คือค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ โดยที่ A เป็นค่าคงที่เท่ากับ 40.3

$$K = \frac{10^{-16}}{A}\left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\right) \tag{2.7}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อนำสมการที่ (2.5) – (2.4) จัดรูปและใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแสดงดังสมการที่ (2.8)

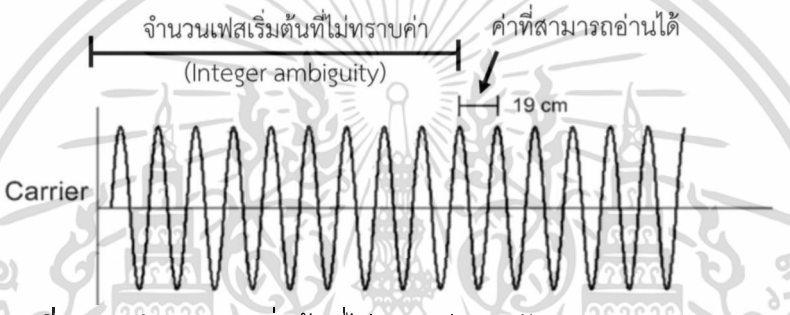
$$STEC_L = K(L_1 - L_2) + STEC_{ambiguity} + STEC_{noise} \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $STEC_L$ คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแนวสายตาที่คำนวณมาจากผลรวมเชิงเส้นของระยะทางเทียมจากสัญญาณ carrier-phase โดยที่อาจจะมีการเกิดคลื่นหลุด (Cycle slip) อยู่ด้วย, $STEC_{ambiguity}$ คือค่าความผิดพลาดในหน่วย TECu ที่เกิดจากความกำกวม (Ambiguity) ของการนับเฟสของสัญญาณ

2.3.1 การเกิดคลื่นหลุด (Cycle slip)

คลื่นหลุดเกิดจากการความผิดพลาดของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในการติดตามเฟสของสัญญาณ carrier-phase ซึ่งเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น สัญญาณสะท้อน ความแรงของสัญญาณน้อย หรือความแปรปรวนของธรรมชาติ เป็นต้น ทำให้ค่าระยะทางเทียมจากสัญญาณ carrier-phase ไม่ทราบถึงจำนวนรอบของคลื่นที่ผ่านมาในช่วง จึงจำเป็นต้องเริ่มกระบวนการหาเฟสเริ่มต้นใหม่อีกครั้ง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 จำนวนเฟสเริ่มต้นที่ไม่ทราบค่าของสัญญาณ carrier-phase

จากรูปที่ 2.11 การเกิดคลื่นหลุดของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ส่งผลให้ข้อมูลเกิดความไม่ต่อเนื่อง และทำให้ค่าระยะทางเทียมจากสัญญาณ carrier-phase เกิดความคลาดเคลื่อน โดยวิธีการแก้ไข คือ

1. ตรวจค้นหาตำแหน่งที่เกิดคลื่นหลุดโดยหาจุดที่ค่า $STEC_L$ แตกต่างกันมาก และช่วงเวลาที่ $STEC_L$ หายไป

2. แก้ไขระดับของ $STEC_L$ โดยปรับค่าระดับของ $STEC_L$ ที่เกิดคลื่นหลุดให้เท่ากัน และประมาณค่าในช่วงข้อมูลที่หายไป

2.3.2 การประมาณค่ากำกวม (Ambiguity)

หลังจากการแก้ไขการเกิดคลื่นหลุดแล้วจะพบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่คำนวณจากระยะทางเทียมของ carrier-phase ในสมการที่ (2.6) – (2.7) จะมีปัญหาในการระบุรอบของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ไม่สามารถระบุจุดเริ่มต้นของข้อมูลได้ ทำให้ค่าระยะทางเทียมจากสัญญาณ carrier-phase เกิดค่าไบอัสขึ้น และเนื่องจากระดับของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากสัญญาณ code นั้นไม่มีค่าไบอัส เนื่องจากสามารถกำหนดจุดเริ่มต้นของข้อมูลได้จากการทำสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (Autocorrelation) ดังนั้นวิธีการแก้ไขค่าความกำกวมนี้สามารถแก้ไขได้โดยหาค่าส่วนต่างเฉลี่ยได้ดังนี้

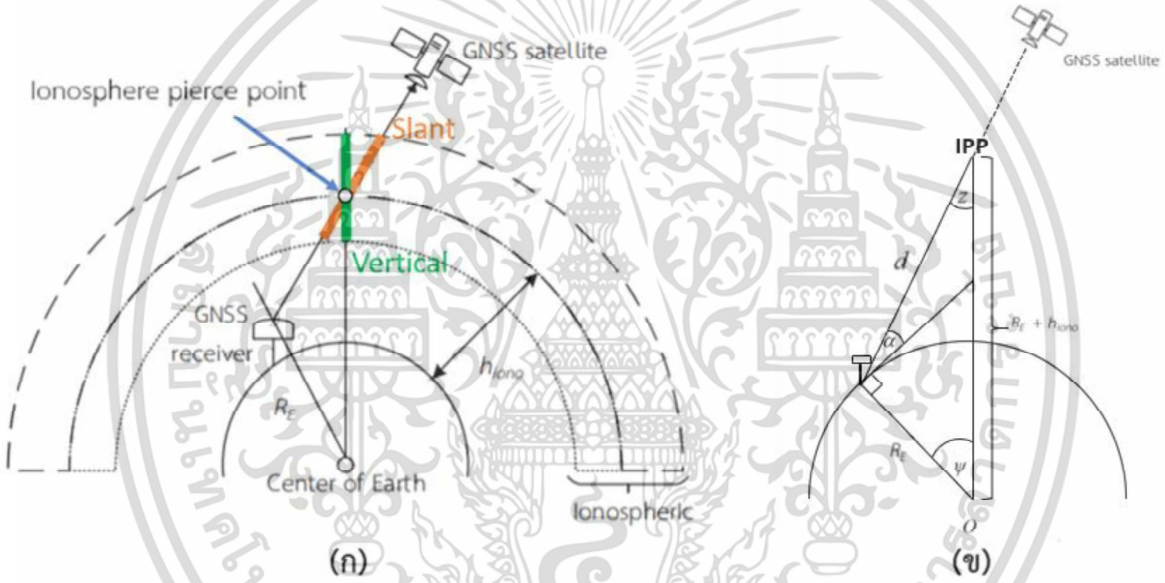
$$STEC = STEC_{l,i}^{j} + (\overline{STEC_p^j} - \overline{STEC_l^j}) \tag{2.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า $STEC$ คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ไม่มีค่าไบอัสความกำกวม i คือช่วงของข้อมูลตามเวลา j คือช่วงของข้อมูลตามหมายเลขดาวเทียม (PRN) $\overline{STEC_p^j}$ และ $\overline{STEC_l^j}$ คือค่าเฉลี่ยของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงของระยะทางเทียมจาก code และระยะทางเทียมจาก carrier-phase ตามลำดับ

2.3.3 การคำนวณจุดตัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPP)

โดยทั่วไปแล้วหากพูดถึงค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะหมายถึงปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง ในการทำแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจะคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุดตัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere pierce point: IPP) ได้จากค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงและตำแหน่งของดาวเทียมด้วยแบบจำลอง Single Layer Model โดยกำหนดให้ตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดของผู้รับ คือ (ϕ_u , λ_u) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เส้นทางการเดินทางของสัญญาณจีเอ็นเอสเอสผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากดาวเทียมมายังเครื่องรับ
(ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง

สามารถคำนวณตำแหน่ง IPP ได้โดย

$$\phi_{IPP} = \phi_u + \psi \cos A \tag{2.10}$$

$$\lambda_{IPP} = \lambda_u + \frac{\psi \sin A}{\cos \phi_{IPP}} \tag{2.11}$$

โดย A คือมุมกวาด (Azimuth) จากตำแหน่งผู้รับไปยังดาวเทียมในหน่วยครึ่งวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงเป็นค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง

จากรูปที่ 2.12 สามารถแปลงค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงเป็นค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งโดยใช้สมการความสัมพันธ์ (Mapping function) ดังนี้

$$MF = \sqrt{1 - \left[\frac{R_E \times \cos(\alpha)}{\left(R_E + h_{iono}\right)} \right]^2} \tag{2.12}$$

โดยที่

$$VTEC = STEC \times MF \tag{2.13}$$

2.3.5 ค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากดาวเทียม

ผลต่างค่าไบอัสในสองความถี่ของสัญญาณ code (DCB) จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาหนึ่ง [6] ซึ่งผู้ใช้งานทั่วไปสามารถรับค่าไบอัสมาคำนวณเป็นค่าแก้ไขได้ค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากดาวเทียมแต่ละดวงได้ โดยมีผู้ให้บริการจาก CODE [7] (Center for Orbit Determination in Europe) ให้บริการข้อมูลค่าไบอัสจากดาวเทียม

2.3.6 ค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากเครื่องรับสัญญาณ

โดยทั่วไปค่าหน่วงเวลาที่เกิดจากเครื่องรับที่มีสาเหตุมาจากความผิดพลาดของอุปกรณ์จะละไว้ เนื่องจากมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าหน่วงเวลาอื่น แต่ในการคำนวณค่าไบอัสจากเครื่องรับจะรวมค่าหน่วงเวลาของ DCB อื่นๆ นอกเหนือจาก DCB ของดาวเทียม โดยเรียกว่าประมาณค่าไบอัสจากเครื่องรับ ซึ่งจะใช้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ปราศจากค่าไบอัสจากดาวเทียม โดยวิธีประมาณค่ามีหลายวิธี โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ 2 วิธีหลัก ๆ คือ วิธี Zero-adjust [8] และหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด [9] (Minimum standard deviation) โดยวิธี Zero-adjust จะให้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับศูนย์และจะมีค่าเท่ากับไบอัสของเครื่องรับ แต่ในพื้นที่ของเครื่องรับบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลก จะมีค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงค่อนข้างสูง ทำให้การประมาณค่าโดยวิธี Zero-adjust ทำให้เกิดความผิดพลาดในการประมาณค่าไบอัสได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้การประมาณค่าด้วยหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด โดยจะใช้การคำนวณค่าความแปรปรวนจากการเปลี่ยนค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงเป็นปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจากสมการที่ (2.13)

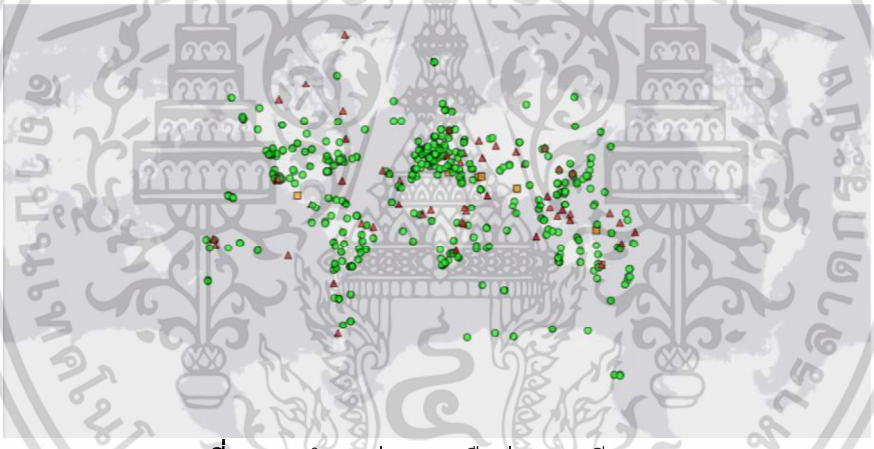
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แบบจำลองปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

ปัจจุบันมีแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นทั้งในรูปแบบแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิทั่วโลกและแบบภูมิภาค เช่น ศูนย์การกำหนดวงโคจรในยุโรป (Center for Orbit Determination in Europe: CODE) และแบบจำลองไอโอโนสเฟียร์อ้างอิงระหว่างประเทศ (International Reference Ionosphere: IRI)

2.4.1 Center for Orbit Determination Europe (CODE)

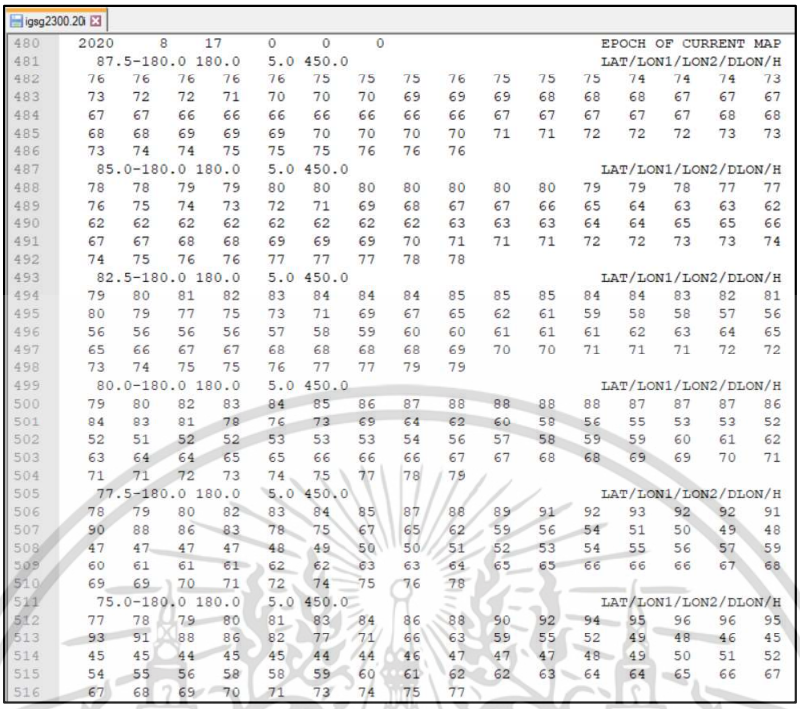
แผนที่ไอโอโนสเฟียร์ทั่วโลก (Global ionosphere maps: GIMs) ถูกสร้างขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ศูนย์สำหรับการกำหนดวงโคจรในยุโรป (CODE) และ European Space Agency (ESA) โดยใช้ข้อมูลจากสถานี GPS และ GLONASS กว่า 200 แห่งของ International GNSS (IGS) และในสถาบันอื่นในกว่า 80 ประเทศ ดังแสดงตำแหน่งของเครือข่ายสถานีของ IGS จะแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่สถานีในไทยจะประกอบไปด้วย 3 สถานีที่จังหวัดเชียงใหม่ ชุมพร และกรุงเทพ



รูปที่ 2.13 ตำแหน่งของเครือข่ายสถานีของ IGS (https://www.igs.org/network)

โดยที่ CODE ให้บริการข้อมูลแผนที่ไอโอโนสเฟียร์ในรูปแบบ (Ionosphere map exchange: IONEX) ดังแสดงในรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



igsg2300.20i

```
  2020     8    17     0     0     0                        EPOCH OF CURRENT MAP
    87.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
    76   76   76   76   76   75   75   75   76   75   75   75   74   74   74   73
    73   72   72   71   70   70   70   69   69   69   68   68   68   67   67   67
    67   67   66   66   66   66   66   66   66   67   67   67   67   67   68   68
    68   68   69   69   69   70   70   70   70   71   71   72   72   72   73   73
    73   74   74   75   75   75   76   76   76
    85.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
    78   78   79   79   80   80   80   80   80   80   80   79   79   78   77   77
    76   75   74   73   72   71   69   68   67   67   66   65   64   63   63   62
    62   62   62   62   62   62   62   62   63   63   63   64   64   65   65   66
    67   67   68   68   69   69   69   70   71   71   71   72   72   73   73   74
    74   75   76   76   77   77   77   78   78
    82.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
    79   80   81   82   83   84   84   84   85   85   85   84   84   83   82   81
    80   79   77   75   73   71   69   67   65   62   61   59   58   58   57   56
    56   56   56   56   57   58   59   60   60   61   61   61   62   63   64   65
    65   66   67   67   68   68   68   68   69   70   70   71   71   71   72   72
    73   74   75   75   76   77   77   79   79
    80.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
    79   80   82   83   84   85   86   87   88   88   88   88   87   87   87   86
    84   83   81   78   76   73   69   64   62   60   58   56   55   53   53   52
    52   51   52   52   53   53   53   54   56   57   58   59   59   60   61   62
    63   64   64   65   65   66   66   66   67   67   68   68   69   69   70   71
    71   71   72   73   74   75   77   78   79
    77.5-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
    78   79   80   82   83   84   85   87   88   89   91   92   93   92   92   91
    90   88   86   83   78   75   67   65   62   59   56   54   51   50   49   48
    47   47   47   47   48   49   50   50   51   52   53   54   55   56   57   59
    60   61   61   61   62   62   63   63   64   65   65   66   66   66   67   68
    69   69   70   71   72   74   75   76   78
    75.0-180.0 180.0   5.0 450.0                           LAT/LON1/LON2/DLON/H
    77   78   79   80   81   83   84   86   88   90   92   94   95   96   96   95
    93   91   88   86   82   77   71   66   63   59   55   52   49   48   46   45
    45   45   44   45   45   44   44   46   47   47   47   48   49   50   51   52
    54   55   56   58   58   59   60   61   62   62   63   64   64   65   66   67
    67   68   69   70   71   73   74   75   77
```

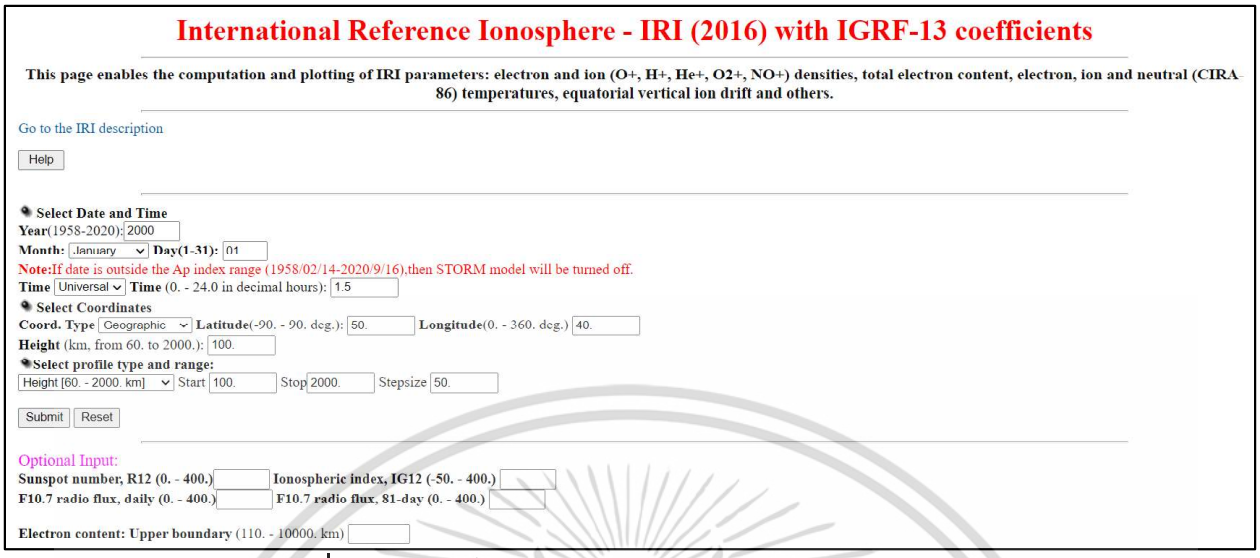
รูปที่ 2.14 ไฟล์ IONEX ของวันที่ 17 สิงหาคม 2563 (DOY 230)

จากรูปที่ 2.14 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในไฟล์ IONEX นั้นจะแสดงผลเป็นค่ากริด โดยที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแต่ละกริดนั้นคำนวณจากแบบจำลอง spherical harmonic (SH) และในแต่ละเวลาจะให้ค่าที่แต่ละติจูดที่ -87.5 ถึง 87.5 องศา และลองจิจูดที่ -180 ถึง 180 องศา ด้วยขนาดของกริดที่ 2.5 x 5 ละติจูดและลองจิจูดตามลำดับ

2.4.2 International Reference Ionosphere (IRI) model

International Reference Ionosphere (IRI) model เป็นโครงการระดับนานาชาติที่ได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการวิจัยอวกาศ (Committee on Space Research: COSPAR) และ International Union of radio Science (URSI) ตั้งแต่ปี 1978 โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำนายพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์จากข้อมูลที่มีอยู่ทั่วโลกจากระบบภาคพื้นดินและการสังเกตการณ์จากดาวเทียม และยังมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของแบบจำลอง IRI อย่างต่อเนื่อง ล่าสุดคือแบบจำลอง IRI 2016 ซึ่งจะให้พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เช่นค่า F2 peak height (hmF2), Propagation factor M3000F2, F2 peak plasma frequency (foF2), Electron density (NmF2 และ Vertical ionospheric electron content (VTEC) โดยจะให้บริการผ่านหน้าเว็ปไซต์ https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 หน้าเว็ปไซต์ของการให้บริการแบบจำลอง IRI 2016 (https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php)

จากเนื้อหาที่กล่าวมาในบทที่ 2 จะเป็นการอธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับพารามิเตอร์และทฤษฎีเกี่ยวกับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสและค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ในบทถัดไปจะเป็นการนำเนื้อหาที่กล่าวมาทั้งหมดมาใช้ในการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่สองมิติ เนื่องจากค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากแบบจำลองในประเทศไทยนั้น มีสถานีย่อยที่ค่อนข้างน้อยกว่า ทำให้ได้ผลลัพธ์ของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ไม่แม่นยำเท่าค่าจริง และในแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างจากแบบจำลองนั้นจะได้ค่าเป็นกริดที่ไม่ละเอียด ในเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ผันผวน แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากแบบจำลองย่อมไม่สามารถแสดงผลได้อย่างแม่นยำเท่ากับค่าข้อมูลจริง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากข้อมูลจริง และรวมถึงการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
แบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่สองมิติ

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่สองมิติ โดยในหัวข้อที่ 3.1 จะกล่าวถึงการสร้างแบบจำลองแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและรวมถึงนำเสนอเทคนิคใหม่ในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในประเทศไทยด้วยระบบ GPS ในหัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงการขยายผลการวิจัยเป็นการสร้างแผนที่ชนิดอื่นๆ จากแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในสังเกตสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยระบบจีเอ็นเอสเอส และในหัวข้อที่ 3.3 จะกล่าวถึงการสร้างเทคนิคในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยกราฟ Keogram

3.1 เทคนิคในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

3.1.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

จากการศึกษาแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง (VTEC map) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น เทคนิค B-spline [10] การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) [11] และปัจจุบันเทคนิค spherical harmonic model (SHM) [12] เป็นเทคนิคที่นิยมในงานวิจัยสร้างแบบจำลองของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยสำหรับในประเทศไทยมีงานวิจัยก่อนหน้า [13] ได้มีการนำเสนอเทคนิค Adjusted spherical surface harmonic (Adjusted SHM: ASHM) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ปรับปรุงจาก SHM สามารถสรุปข้อดีและข้อด้อยของแต่ละงานวิจัย ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

ปี พ.ศ. ที่ตีพิมพ์	อัลกอริทึมที่นำเสนอ	ข้อเด่น	ข้อด้อย
2553	B-spline [10]	สามารถแสดงค่าผิดปกติของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้	ต้องปรับค่าสัมประสิทธิ์ให้เหมาะสมกับแต่ละเหตุการณ์เสมอ ซึ่งในการทำงานแบบเรียลไทม์ไม่สามารถปรับ ค่าสัมประสิทธิ์ให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้
2558	โครงข่ายประสาทเทียม [11]	แสดงแนวโน้มของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้ตามเหตุการณ์ของค่าอินพุตจำนวน	ไม่สามารถแสดงเหตุการณ์ผิดปกติของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

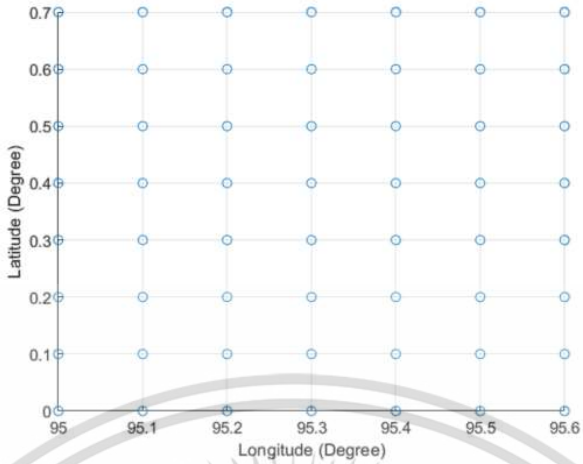
ปี พ.ศ. ที่ตีพิมพ์	อัลกอริทึมที่นำเสนอ	ข้อเด่น	ข้อด้อย
		จุดดับ (Sunspot number) ในอดีต	
2561	Adjusted spherical surface harmonic [13]	แสดงแนวโน้มของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้ดีในบริเวณประเทศไทย	ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในจุดที่ห่างไกลจากประเทศไทยจะยังคงมีค่าผิดพลาดอยู่มาก

จากตารางที่ 3.1 ในงานก่อนหน้านี้ยังมีข้อให้พัฒนาได้คือ ในการประมาณค่านอกช่วง (Extrapolate) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในจุดที่ห่างไกลจากประเทศไทยจะยังคงมีค่าผิดพลาดอยู่มากเนื่องจากเทคนิคเหล่านี้ขึ้นอยู่บนพื้นฐานของการประมาณค่าพหุนาม ในงานนี้เพื่อพัฒนาการคำนวณหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิให้ได้พิกัดตำแหน่งที่ละเอียดขึ้น ได้มีการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ณ จุดตัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยมีการใช้เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน [14] ประมาณค่าให้เต็มในทุกพิกัดตำแหน่งของประเทศไทยและใกล้เคียง (เรียกว่า smooth TEC) โดยที่เทคนิคนี้เป็นการประมาณค่าตามลักษณะการเคลื่อนที่ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่มีการเปลี่ยนแปลงทางด้านละติจูดมากกว่าทางด้านลองจิจูด ร่วมกับการใช้เทคนิค Thin plate spline [15] ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการทำให้ smooth TEC มีค่าเข้าใกล้กับปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สังเกตการณ์ได้จริง ในส่วนของการการทดสอบค่าความแม่นยำ จะมีการเปรียบเทียบกับแบบจำลองของศูนย์การกำหนดวงโคจรในยุโรป (Center for Orbit Determination in Europe: CODE) [16], เทคนิค Cross-validation, ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) และเปรียบเทียบกับเทคนิค ASHM ในงานก่อนหน้า

3.1.2 วิธีถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน (Gaussian Kernel Regression)

จากงานก่อนหน้านี้ได้มีการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิบริเวณประเทศไทยด้วยเทคนิค ASHM ซึ่งมีข้อด้อยเมื่อมีการประมาณค่าในจุดที่ห่างไกลจากบริเวณที่มีข้อมูลในแผนที่ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนซึ่งเป็นฟังก์ชันการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น 2 มิติ เป็นการประมาณค่าเส้นสมการถดถอยโดยการหาค่าเฉลี่ยรอบจุดที่ต้องการประมาณค่า ในที่นี้พิกัดของพื้นที่ประเทศไทยในตำแหน่ง 0 - 25 องศาละติจูด และ 95 – 110 องศาลองจิจูด ที่ห่างกันทุก 0.1 x0.1 องศา (จะได้กริดขนาด 251x151) แสดงได้ดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของกริดที่มีละติจูดตั้งแต่ 0 ถึง 0.7 และลองจิจูด 95 ถึง 95.6 ที่มีความละเอียด 0.1 × 0.1

เส้นสมการถดถอยของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ จะถูกคำนวณจากค่าเฉลี่ยปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สังเกตได้ที่จุด IPP แต่ละจุด ตามแต่ละแกนละติจูดและลองจิจูดหากให้จำนวนกริดทั้งหมดมีค่า N และจำนวนของจุด IPP มีค่าเท่ากับ M สมการถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแต่ละกริดแสดงเป็น

$$TEC_{grid,i} = \frac{\sum_{j=1}^{M}\left(K(\mathbf{x}_{grid,i},\mathbf{x}_{ipp,j})\times TEC_{ipp,j}\right)}{\sum_{j=1}^{M}K(\mathbf{x}_{grid,i},\mathbf{x}_{ipp,j})} \quad (3.1)$$

โดยที่ $\boldsymbol{x}_{ipp,j}$ คือพิกัดทางภูมิศาสตร์ของจุด IPP ที่แสดงด้วยเมทริกซ์ขนาด 2x1 ตามแนวละติจูดและลองจิจูด $\boldsymbol{x}_{\text{grid,i}}$ คือพิกัดของของกริดแต่ละกริดที่แสดงด้วยเมทริกซ์ขนาด 2x1 ตามแนวละติจูดและลองจิจูด, $TEC_{ipp,j}$ คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่เครื่องรับสามารถรับได้จริง ณ ตำแหน่ง IPP, $TEC_{grid,i}$ คือค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่คำนวณของกริดที่ i และเมื่อครบทุกกริดจะได้ค่า TEC_{grid} ที่มีเมทริกซ์ขนาด 251x151 (Smooth TEC) และ K คือค่าถ่วงน้ำหนักแบบเคอร์เนลเกาส์เซียนในแต่ละแกนละติจูดและลองจิจูด แสดงได้ดังนี้

$$K(\mathbf{x}_{grid,i},\mathbf{x}_{ipp,j}) = exp\left(-\frac{\left\|\mathbf{x}_{grid,i}-\mathbf{x}_{ipp,j}\right\|^2}{2\sigma_x\sigma_y}\right) \quad (3.2)$$

โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนัก K ที่แต่ละกริดนั้นจะแปรผกผันกับระยะห่างกำลังสองแบบยุคลิด จาก $\boldsymbol{x}_{ipp}$ ไปยัง $\boldsymbol{x}_{\text{grid,i}}$ ใดๆ σ_x คือแบนด์วิดท์ของเคอร์เนลเกาส์เซียน(ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ในแกนลองจิจูด และ σ_y คือแบนด์วิดท์ของเคอร์เนลเกาส์เซียนในแกนลองจิจูด โดยทั่วไปแล้วค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะแตกต่างกันมากกว่าในแต่ละละติจูด การถ่วงน้ำหนักของวิธีการถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนทำให้แบนด์วิดท์บนแกนลองจิจูด (σ_x)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าแกนละติจูด (σ_y) หรือกล่าวได้ว่าในแนวแกนละติจูด จะมีการถ่วงน้ำหนักที่มากกว่า

3.1.3 วิธีประมาณค่าด้วย Thin plate spline

เนื่องจากในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิความแม่นยำสูงนั้นนั้นจำเป็นต้องทำให้ค่าบนแผนที่มีค่าใกล้เคียงกันกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริง ณ จุด IPP ที่สุด เนื่องจากค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริง ณ จุด IPP นั้นไม่ได้อยู่ในตำแหน่งพิกัดกริด จึงต้องนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริง ณ จุด IPP มาจัดรูปแบบให้อยู่ในตำแหน่ง $\boldsymbol{x}_{\text{grid}}$ โดยที่แต่ในแต่ละกริดจะทำการค้นหาตำแหน่ง IPP ในระยะ 0.05 องศาละติจูด x 0.05 องศาลองจิจูด โดยหากกริดใดที่พบค่า IPP มากกว่า 1 ค่าจะใช้ค่ามัธยฐาน โดยจะใช้ $\overline{TEC_{ipp}}$ เป็นตัวแทนค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริงของตำแหน่ง $\boldsymbol{x}_{\text{grid}}$ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำวิธีของ Thin plate spline ซึ่งเป็นการปรับพื้นผิว (Surface Fitting) มาใช้เพื่อปรับให้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิราบเรียบจากเคอร์เนลเกาส์เซียน (TEC_{grid}) ในวิธีก่อนหน้า ให้มีค่าเข้าใกล้กับปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สังเกตการณ์ได้จริงที่กริดของ IPP ($\overline{TEC_{ipp}}$) โดยการทำให้ TEC_{grid} มีค่าลู่เข้าหา $\overline{TEC_{ipp}}$ โดยมีค่าผิดพลาดต่ำที่สุดนั้นสามารถแสดงฟังก์ชันความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\mathbf{TEC}_{\text{tps}} = \mathrm{p} \cdot \mathrm{E}(\mathbf{f}) + (1-\mathrm{p}) \cdot \mathbf{R}(\mathbf{f}) \tag{3.3}$$

เมื่อ p คือพารามิเตอร์การปรับให้เรียบระหว่างทั้งสองค่าที่มีการลู่เข้าหากันที่ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ผิดพลาดต่ำที่สุด ($\mathrm{E}(\mathbf{f})$) ดังนี้

$$\mathbf{E}(\mathbf{f}) = \sum_{i=1}^{N} \left\| \mathrm{TEC}_{\text{grid,i}} - \mathbf{f}\left(\overline{TEC}_{\text{ipp,i}}\right) \right\|^2 \tag{3.4}$$

เมื่อ $\mathbf{f}$ คือฟังก์ชันปรับพื้นผิวของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ในตำแหน่งของกริด โดยค่าที่ทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์ผิดพลาดต่ำที่สุดโดยการวัดความเรียบ (ลู่เข้า) ของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสามารถคำนวณได้จาก

$$\mathbf{R}(\mathbf{f}) = \int\int \left[\left(\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathrm{x}_1^2} \right)^2 + 2\left(\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathrm{x}_1 \mathrm{x}_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathrm{x}_2^2} \right)^2 \right] \mathrm{dx}_1 \mathrm{dx}_2 \tag{3.5}$$

เมื่อ ∂_i เป็นอนุพันธ์ย่อยของตำแหน่งกริด $\mathbf{f}$ ในแกนละติจูดและลองจิจูดที่จะทำให้ $\mathbf{f}$ ที่ติดกันที่มีค่าใกล้กันที่สุด

3.2 เทคนิคในการวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

เนื่องจากในแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงผลในหน่วย TECu ซึ่งในบางครั้งเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติในขนาดที่แคบกว่าค่าของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมาก จะทำให้แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิไม่อาจแสดงถึงความผิดปกติได้อย่างชัดเจน จึงจำเป็นต้องนำแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สามารถแสดงความผิดปกติได้อย่างชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการการวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

จากการศึกษาแนวโน้มงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์กับเหตุการณ์ต่างๆ เช่น ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมา (Equatorial Plasma Bubble: EPB) [1], แผ่นดินไหว [2] และเหตุการณ์อื่นๆ เช่นการยิงจรวด SpaceX Falcon Heavy [3] สามารถสรุปเทคนิคในแต่ละเหตุการณ์ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปงานทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

ปี พ.ศ. ที่ตีพิมพ์	เหตุการณ์	ลักษณะของค่าชั้นไอโอโนสเฟียร์	เทคนิคในการตรวจจับ
2560	ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมา [1]	ความหนาแน่นของพลาสม่าในชั้นบรรยากาศจะลดลงเฉพาะแห่ง และมักเคลื่อนตัวไปยังทิศตะวันออกจากจุดที่ก่อตัว และตั้งฉากกับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก	สร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และตรวจจับหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่มีค่าน้อยกว่าโดยรอบในทิศตั้งฉากกับเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก
2558	แผ่นดินไหว [2]	บริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นดินไหว ชั้นบรรยากาศจะเกิดระลอกคลื่นวงกลม คล้ายกับการหย่อนหินลงน้ำ	แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสองมิติร่วมกับแผนที่ผลต่างแนวโน้มปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ
2561	จรวดเคลื่อนที่ตัดผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ [3]	บริเวณที่จรวดบินผ่าน ชั้นบรรยากาศจะแหวกตัวคล้ายคลื่นที่เกิดจากการพายเรือ ลักษณะเป็นตัว v	สร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และตรวจจับหาค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่มีค่าน้อยและมีขอบแหลมที่มีค่ามาก

ในงานนี้เพื่อพัฒนาการวิเคราะห์แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ จึงได้นำเสนอการสร้าง Keogram จากผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ โดยหวังว่าเมื่อเกิดเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ตัว Keogram ที่นำเสนอจะสามารถตรวจจับขอบของค่าปริมาณอิเล็กตรอนุทธิที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น หรือลดลงได้

3.2.2 แผนที่ Rate Of TEC change Index (ROTI)

ค่า ROTI [17] เป็นค่าที่ใช้วัดความแปรปรวนของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ โดยใช้อัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสามารถคำนวณได้จาก

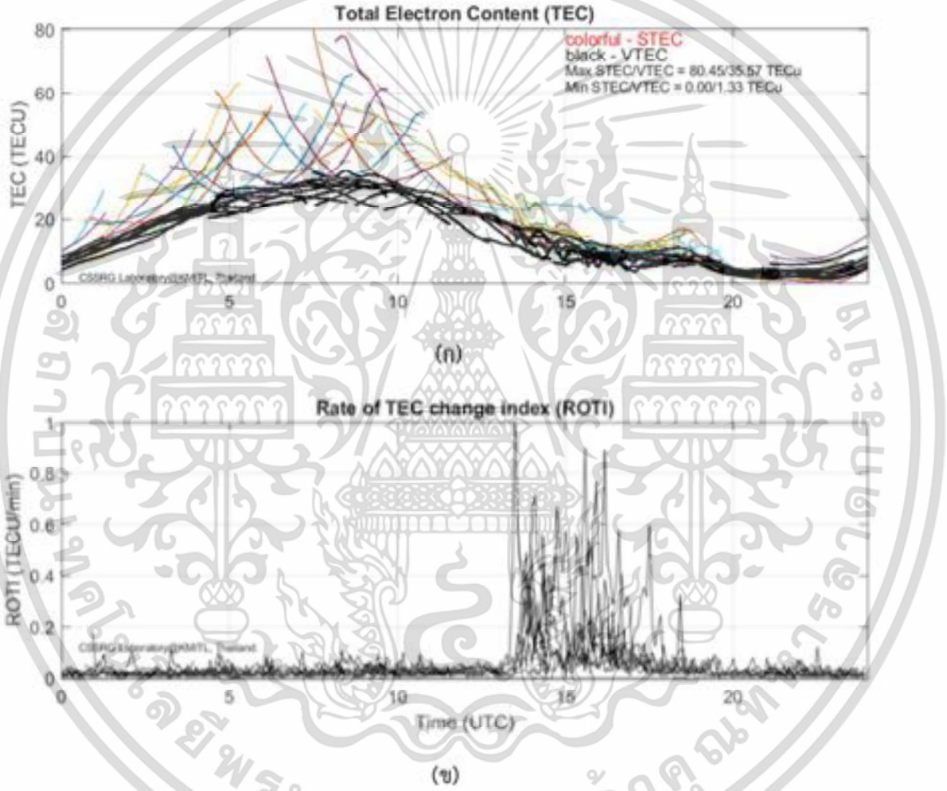
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2} \tag{3.6}$$

โดยที่ค่า ROT ของดาวเทียมดวงที่ i ในเวลา k คือ

$$ROT = \frac{TEC_k^i - TEC_{k-1}^i}{(t_k - t_{k-1})} \tag{3.7}$$

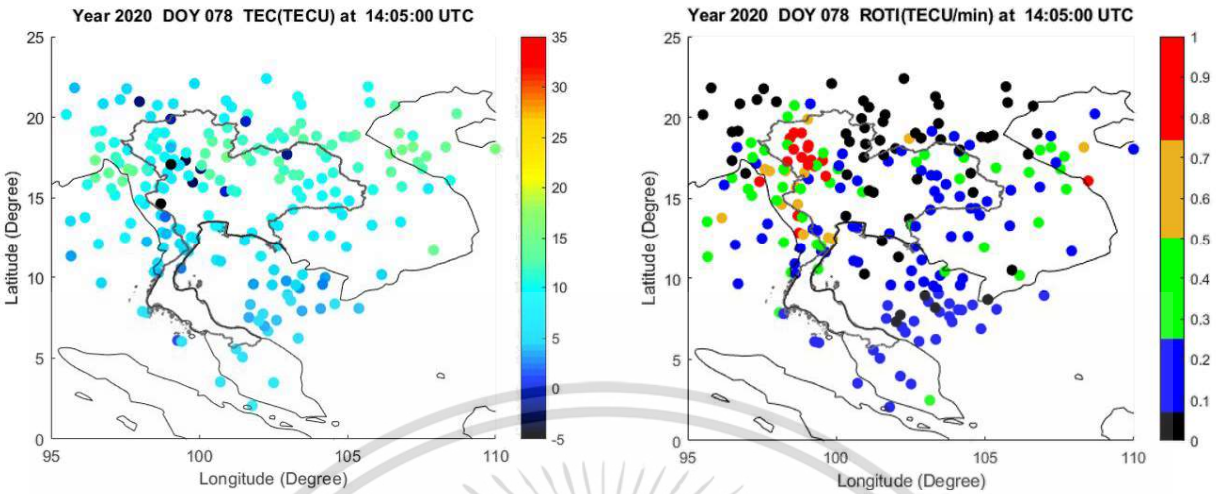
โดยที่ $\langle . \rangle$ คือการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า t_k และ t_{k-1} มีค่าต่างกัน 1 นาที และการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจะใช้ข้อมูล 5 ค่า (5 นาที) นำมาคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ตัวอย่างผลการทดลองใช้ข้อมูลของสถานี KMIT ในวันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างในวันที่มีความแปรปรวนของสถานี KMIT วันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078)
(ก) ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริงที่คำนวณได้ (ข) ค่า ROTI ของดาวเทียม

จากรูปที่ 3.2 ในชั่วโมงที่ 12 ถึง 18 UTC พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมีความแปรปรวนสูง ซึ่งมีค่าแกว่งขึ้นและลงในกรอบ 3 TECu จึงทำให้ค่า ROTI สูงขึ้นด้วยในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งส่งผลให้ในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินั้น มองเห็นความผิดปกติได้น้อยกว่า ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 3.3 แผนที่ในขณะที่มีความแปรปรวนในวันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) เวลา 14.05 UTC (ก) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (ข) แผนที่ ROTI

จากรูปที่ 3.3 (ก) พบว่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 35 TECu โดยค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แปรปรวนนั้นมีค่าน้อยกว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จะแสดงผลอยู่มากทำให้ไม่เห็นถึงความแปรปรวนของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมากนัก แต่ในรูป (ข) แผนที่ ROTI สามารถแสดงให้เห็นจุดที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมีความแปรปรวนได้ ณ ตำแหน่งละติจูดที่ 10 - 20 องศา และลองจิจูดที่ 97 ถึง 102 องศา ในวิทยานิพนธ์นี้จึงสนใจที่จะแสดงค่าความผิดปกตินี้ให้ชัดเจนขึ้น โดยสร้างแผนที่อื่นจากการวิเคราะห์ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้ดังที่จะกล่าวต่อไป

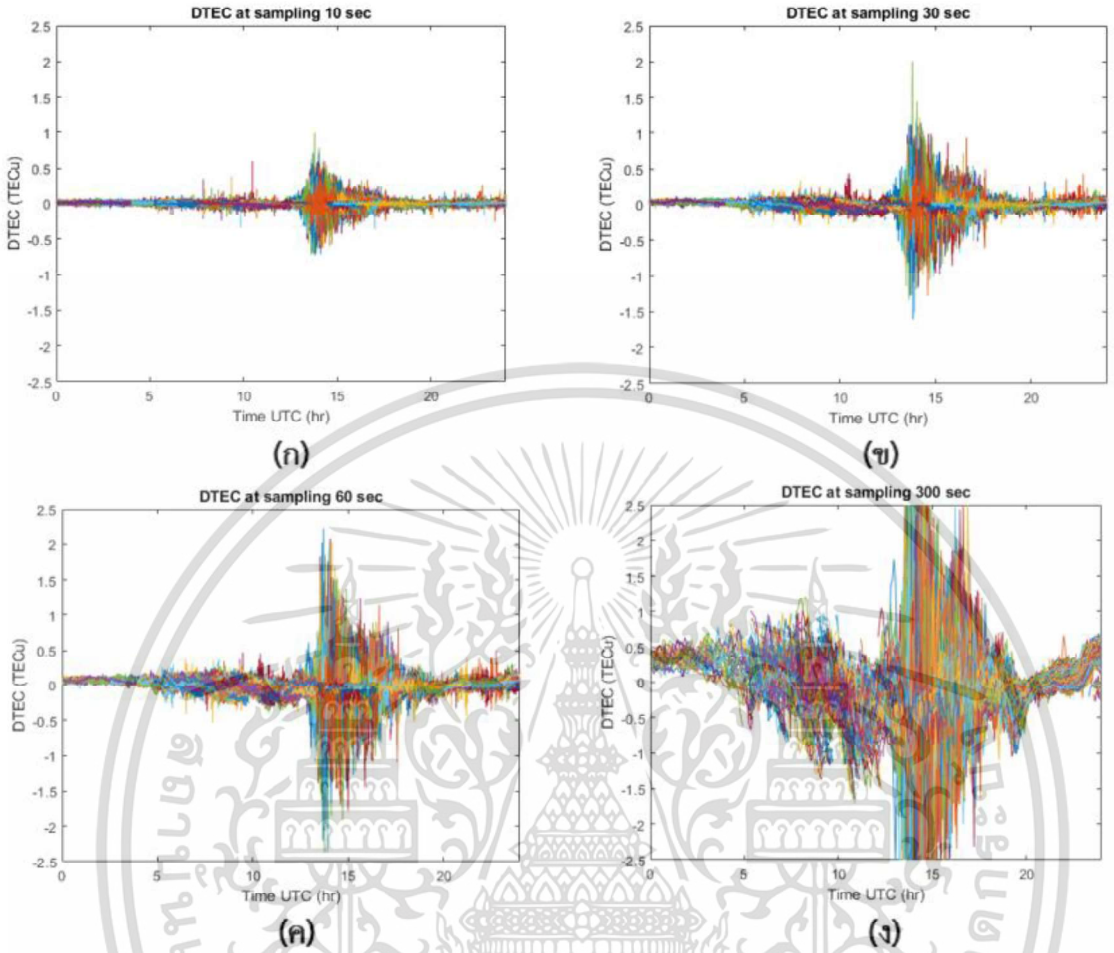
3.2.3 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการใช้ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ในการวิเคราะห์ค่าผลต่างจะให้มุมมองของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่เปลี่ยนแปลงไปทั้งเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ชัดเจนกว่าค่า ROTI ที่แสดงถึงความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งในบางครั้งผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิอาจทำให้เห็นถึงค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นไปในแนวทางเดียวกันในพิกัดตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน โดยสามารถคำนวณค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิดาวเทียมดวงที่ i ขณะเวลา k ในช่วงเวลา j ได้ดังสมการ

$$DTEC = TEC_k^i - TEC_{k-j}^i \tag{3.8}$$

จากนั้นทดลองหาช่วงเวลา j ที่ทำให้ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแสดงความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ดังรูปที่ 3.4 แสดงค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิช่วง j เท่ากับ 10,30,60 และ 300 วินาที

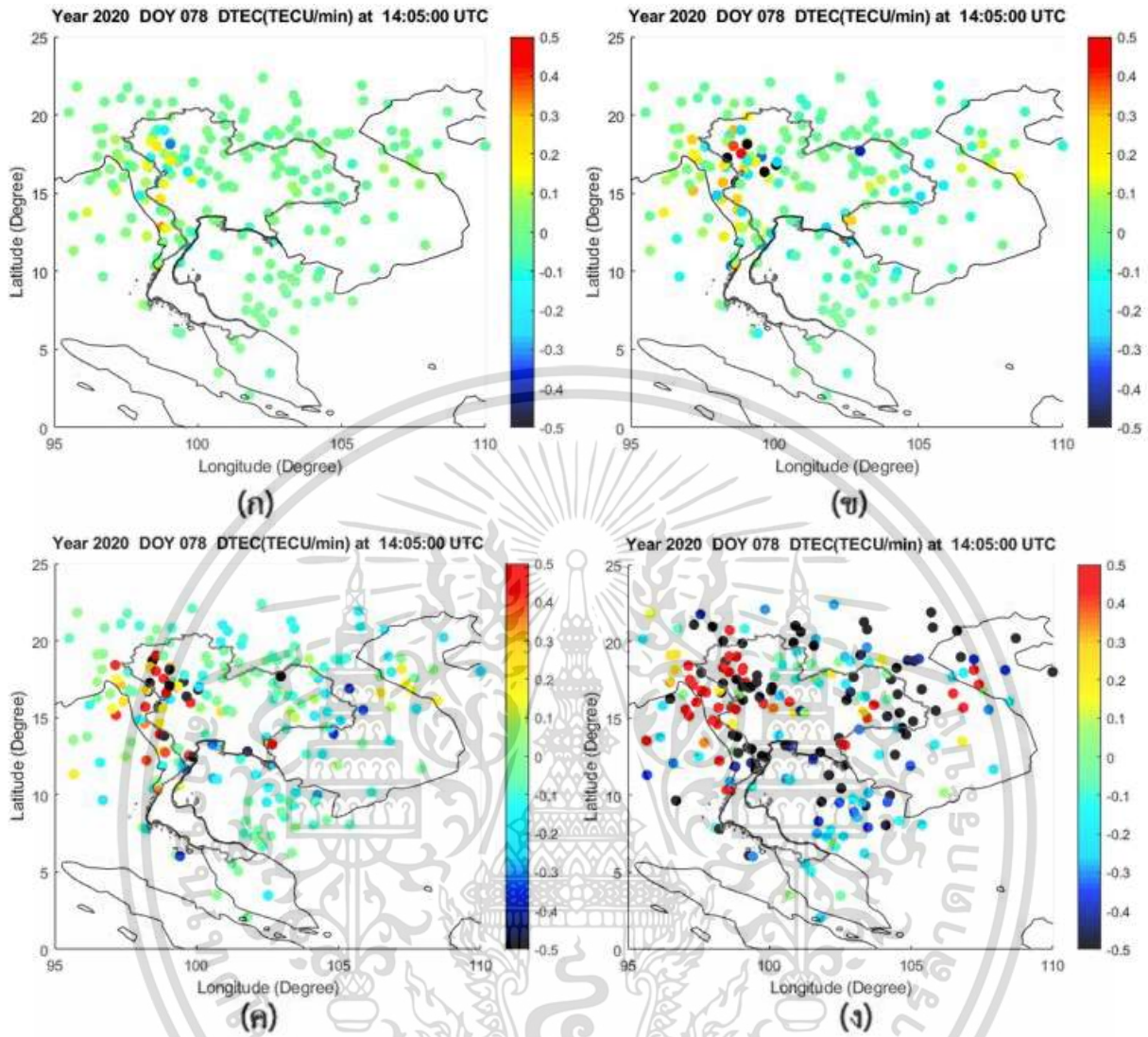
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่มีความแปรปรวนของสถานี KMIT วันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) โดยมีค่า j เท่ากับ
(ก) 10 วินาที (ข) 30 วินาที (ค) 60 วินาที (ง) 300 วินาที

จากรูปที่ 3.4 พบว่าค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแต่ละช่วงเวลาจะมีค่าสูงที่เวลา 12 ถึง 18 UTC ซึ่งเป็นเวลาที่เกิดความแปรปรวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยตัวอย่างในรูป (ก) มีค่าผลต่างเวลาที่ใช้น้อย (10 วินาที) จะทำให้ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมีค่าน้อย และตัวอย่างในรูป (ข) - (ง) พบว่าเมื่อเพิ่มผลต่างเวลา j จะทำให้เห็นถึงความผิดปกติในช่วงความแปรปรวนที่มากขึ้น แต่ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลาปกติก็มากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกค่าผลต่างเวลา j ที่เหมาะสม คือ 30 วินาที โดยพิจารณาจากค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงถึงความผิดปกติได้ในช่วงเวลา 13 – 18 UTC และในช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศเงียบสงบก็ไม่แสดงผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมากเกินกว่า 0.5 TECu นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้ดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



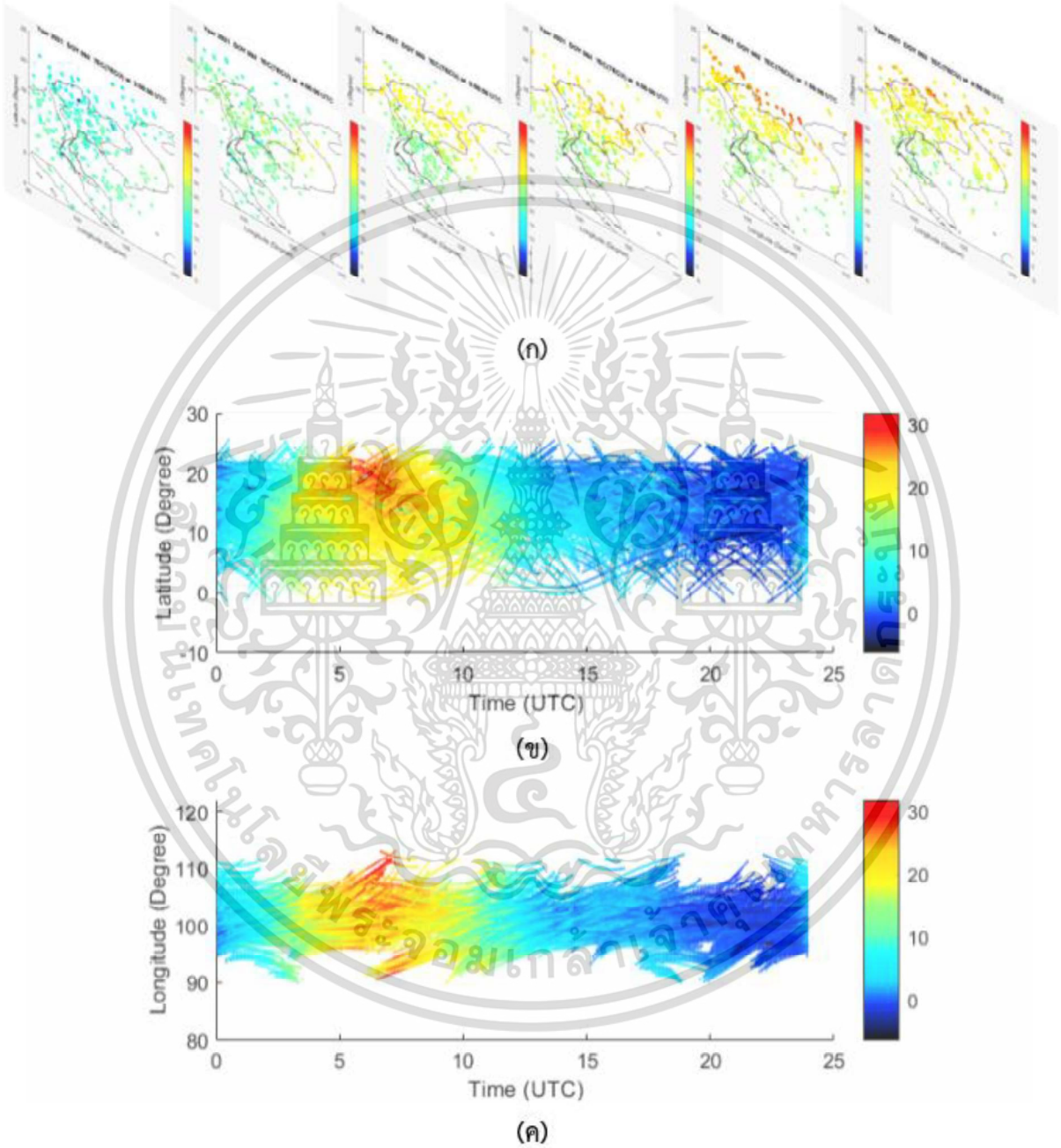
รูปที่ 3.5 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในขณะที่มีความแปรปรวนในวันที่ 18 มีนาคม ปี 2563 (doy 078) เวลา 14.05 UTC โดยมีค่า j เท่ากับ
(ก) 10 วินาที (ข) 30 วินาที (ค) 60 วินาที (ง) 300 วินาที

3.2.4 การสร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่นำเสนอ

จากการสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิใน 30 วินาทีพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิสามารถแสดงถึงความผิดปกติบนแผนที่ได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการใช้ Keogram [18] ในการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดย Keogram เป็นเทคนิคในการพล็อตพารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษา (ในที่นี้คือค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ) ในแต่ละเวลากับแกนของละติจูดและลองจิจูด ซึ่งจะทำให้เห็นถึงมุมมองของค่า TEC ในแนวแกนเวลา โดย Keogram ทางด้านละติจูดจะทำการพล็อตค่าปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนสุทธิในพิกัด IPP ละติจูดในแต่ละเวลา และ Keogram ทางด้านลองจิจูดจะทำการพล็อตค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในพิกัด IPP ลองจิจูดในแต่ละเวลา ตัวอย่างการสร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิวันที่ชั้นบรรยากาศสงบในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การสร้าง Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564

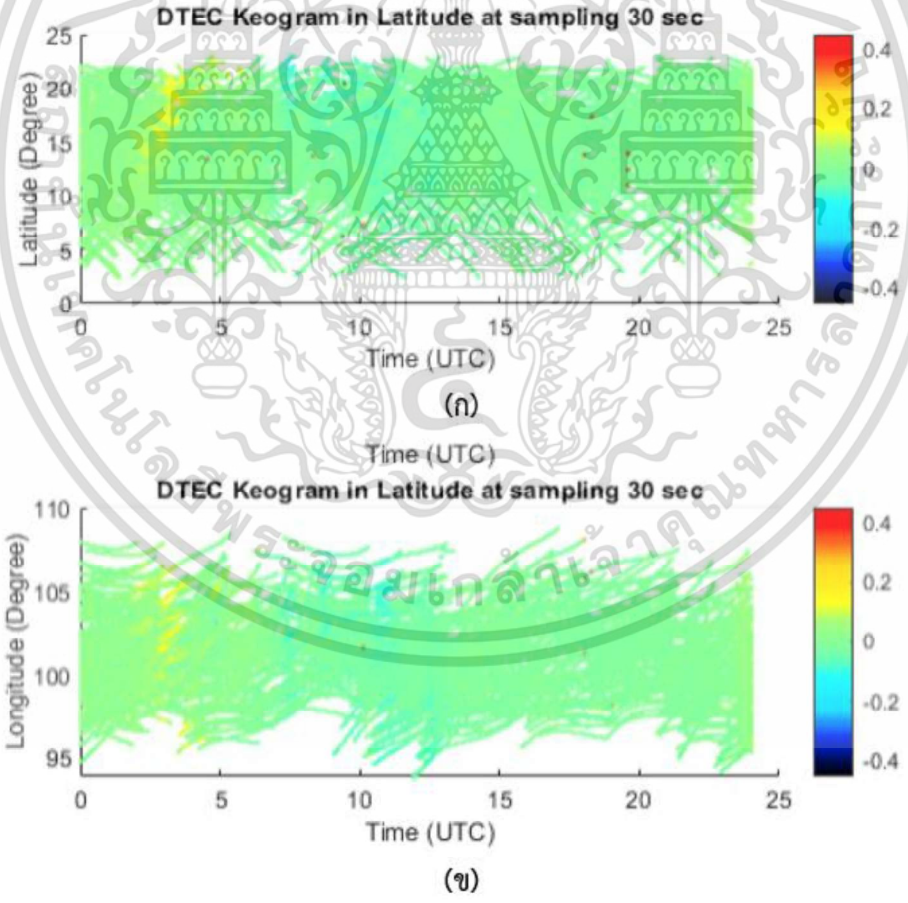
(ก) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (ข) Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแนวแกนละติจูด

(ค) Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแนวแกนลองจิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 (ก) เพื่อดูแนวโน้มของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละเวลา จะต้องดูแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในเวลาต่างๆ ซึ่งการสร้าง Keogram ในมุมของ (ข) พบว่า Keogram สามารถแสดงมุมมองของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในแนวแกนเวลาได้ นั่นคือในเวลากลางวันค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะค่อยๆเพิ่มขึ้นและสูงที่สุดในเวลาประมาณ 6 UTC (13.00 เวลาไทย) จากนั้นจะค่อยๆ ลดลงเมื่อเป็นเวลากลางคืน และพบว่าในเวลากลางวัน (2.00 – 10.00 UTC) ที่ละติจูดสูงกว่า 10 องศา ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมีค่าที่สูงกว่าละติจูดอื่น และจากรูป (ค) ในเวลากลางวันพบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะเพิ่มขึ้นที่บริเวณลองจิจูดสูงก่อน จากนั้นจึงไล่มายังลองจิจูดที่ต่ำกว่า จากภาพ Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิพบว่าปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณที่ตั้งอยู่ในเขตละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กโลกจะมีความแปรปรวนสูงซึ่งสอดคล้องกับปรากฏการณ์ Equatorial Ionization Anomaly (EIA)

จากการศึกษา Keogram ของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการสร้าง Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ โดยจะคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในเวลา 30 วินาที จากนั้นจะสร้างเป็น Keogram ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564
(ก) แนวแกนละติจูด (ข) แนวแกนลองจิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 พบว่า Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิโดยมากจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เกิน 0.2 TECu เว้นแต่ช่วงกลางวันที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมีการเพิ่มขึ้นเป็นปกติอยู่แล้ว ซึ่งหากเกิดความแปรปรวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเทคนิคในการตรวจจับในส่วนต่อไป

3.3 เทคนิคในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

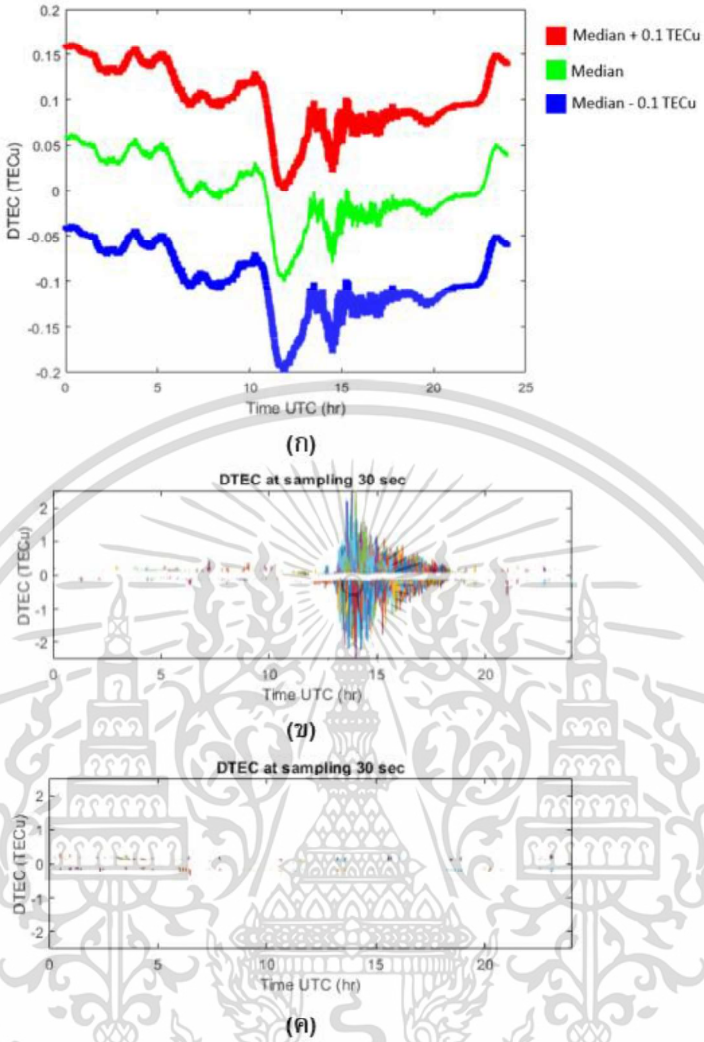
ในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการใช้ Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในการหาทิศทางการเคลื่อนที่ของความผิดปกติ ณ จุด IPP

3.3.1 เกณฑ์การตัดสินใจของ Keogram ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

ก่อนที่จะสร้าง Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินั้น จะต้องนำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมากรองด้วยการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจ (Threshold) ก่อน โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการหาค่ามัธยฐานของค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ
2. ทำการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจจากค่ามัธยฐานของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ± 0.1 TECu
3. นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ที่มีค่าผลต่างน้อยกว่าค่ามัธยฐานของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ± 0.1 TECu ออก เพื่อนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในเวลากลางวันที่อาจมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นปกติและค่าที่มีความแปรปรวนต่ำออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การกรองค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

(ก) เกณฑ์การตัดสินใจในการกรองค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

(ข) ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กรองแล้วในวันที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แปรปรวน

(ค) ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กรองแล้วในวันที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สงบ

จากรูปที่ 3.8 (ก) เกณฑ์การตัดสินใจจะถูกตั้งไว้ที่ค่ามัธยฐาน ของค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ จากนั้นจะตีกรอบบนและกรอบล่างในขอบเขต 0.1 TECu เพื่อกรองนำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ขึ้นหรือลงไปตามค่ามัธยฐานออก โดยในรูป (ข) คือวันที่มีความแปรปรวน และในรูป (ค) คือผลจากการกรองในวันที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สงบ จากนั้นจะนำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้ไปสร้าง Keogram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 สมมติฐานของการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความผิดปกติ เช่น ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมา (Equatorial Plasma Bubble: EPB) [1], แผ่นดินไหว [2] หรือเหตุการณ์อื่นๆ เช่นการยิงจรวด SpaceX Falcon Heavy [3] ย่อมส่งผลให้แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และ Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิเกิดการเปลี่ยนแปลง จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 3.2.1 สามารถสร้างสมมติฐานของเหตุการณ์ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมาได้ว่า ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ผิดปกติจะเกิดออกมาจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กและมีทิศตั้งฉาก โดย Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิทางด้านละติจูดจะต้องเห็นความผิดปกติในละติจูดที่มากกว่า 7 องศา และต้องเกิดแถบในด้านลองจิจูด

สมมติฐานของเหตุการณ์แผ่นดินไหวคือ ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะแปรปรวนในบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหวและแพร่กระจายออกไปทุกทิศทางจากศูนย์กลางด้วยกำลังที่อ่อนลง โดย Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิทางด้านละติจูดและลองจิจูดจะต้องเห็นถึงกลุ่มของจุดกระจายตัวรอบจุดศูนย์กลาง โดยหากเกิดความผิดปกติในบริเวณละติจูดหรือลองจิจูดที่ทำให้เห็นถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของภาพ Keogram จะสามารถคำนวณความเร็วของความผิดปกตินี้ได้โดยการลากเส้นความชัน (การเปลี่ยนแปลงของละติจูดหรือลองจิจูด/เวลา)

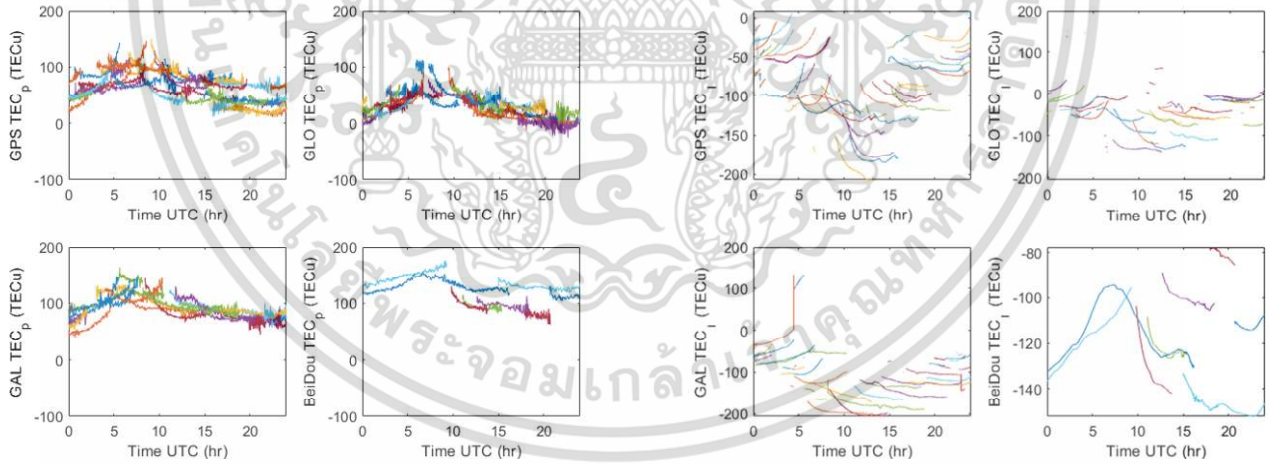
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัย

จากบทที่ 2 และ 3 จะสามารถคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากข้อมูลดาวเทียมในรูปแบบ Receiver Independent Exchange Format (RINEX) และสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย โดยในหัวข้อที่ 4.1 จะกล่าวถึงการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ในหัวข้อที่ 4.2 จะกล่าวถึงผลการนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมาสร้างเป็นแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และในหัวข้อที่ 4.3 จะกล่าวถึงผลในการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ Keogram ของค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

4.1 ผลการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 19 พฤศจิกายน 2563

เมื่อทดลองอ่านค่าจาก RINEX 3 และคำนวณตำแหน่งดาวเทียมได้แล้ว จะสามารถคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้ โดยจะยกตัวอย่างการคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากแต่ละระบบดาวเทียม ในวันที่ 19 พฤศจิกายน 2563 (DOY 324) ดังรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.5



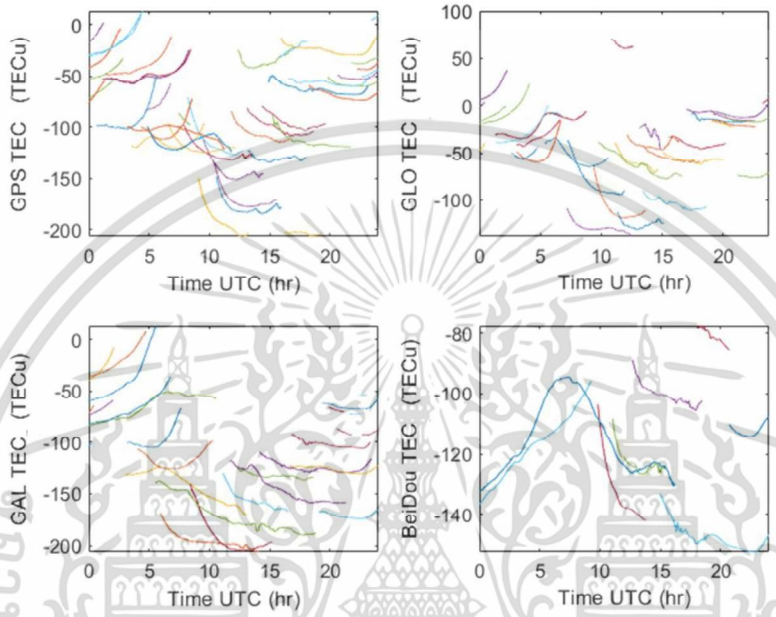
(ก) (ข)

รูปที่ 4.1 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่คำนวณจากข้อมูลดาวเทียม
(ก) : ระยะทางเทียมจาก code (ข) : ระยะทางเทียมจาก carrier-phase

จากรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิด้วยระยะทางเทียมจาก Code และ carrier-phase ของความถี่ที่ 1 และ 2 ได้ โดยจะสังเกตได้ว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวสายตาจากระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

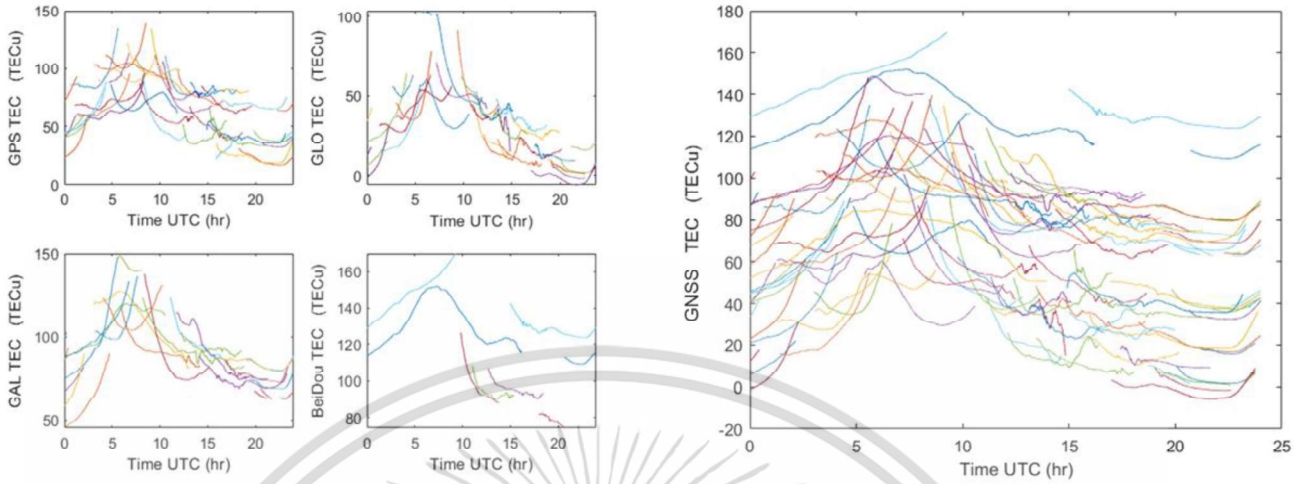
เทียมของสัญญาณ Code จะมีสัญญาณรบกวนสูงกว่า ซึ่งเป็นค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ไม่แม่นยำแต่จะให้ระดับจะมีระดับที่ถูกต้อง ส่วนค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวสายตาของระยะทางเทียมจาก carrier-phase นั้นจะมีค่าที่เรียบและแม่นยำกว่า แต่ยังมีระดับความกำกวม (Ambiguity) และคลื่นหลุด (Cycle slip) อยู่ จึงต้องนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจากระยะทางเทียมของ carrier-phase มาแก้คลื่นหลุดก่อนได้ผลดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจากระยะทางเทียมของ carrier-phase ที่ปราศจากคลื่นหลุด

จากรูปที่ 4.2 เมื่อแก้ไขคลื่นหลุดแล้วจะนำปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจากระยะทางเทียมของ carrier-phase ที่ปราศจากคลื่นหลุดนี้ มาลบความกำกวม (Ambiguity) ด้วยการปรับระดับของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจากระยะทางเทียมของ carrier-phase นี้ให้อยู่ในระดับเดียวกันกับ ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจากระยะทางเทียมของ code ได้ผลดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

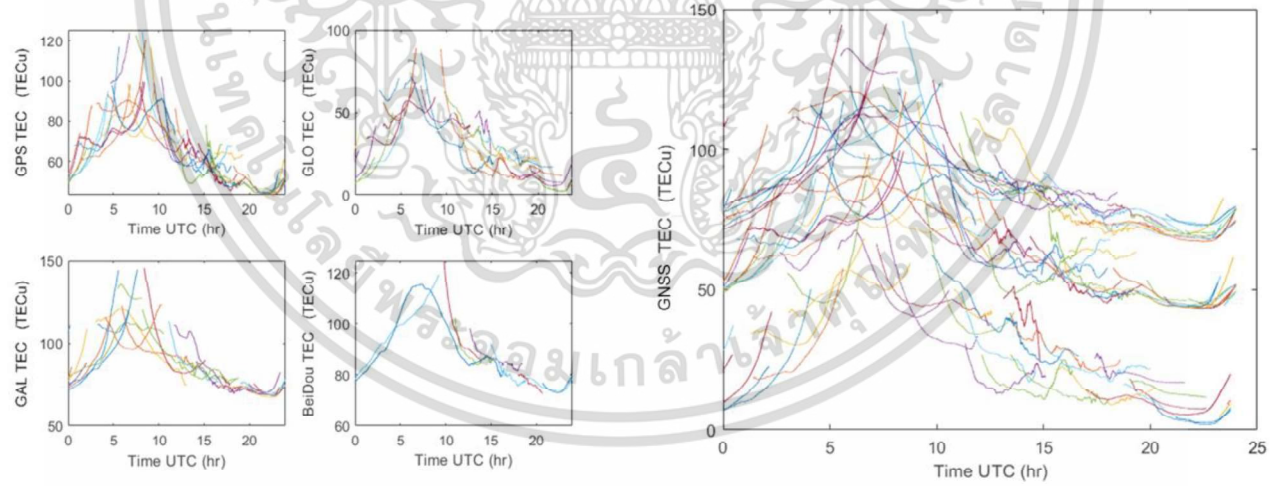


(ก) (ข)

รูปที่ 4.3 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ปราศจากค่าความกำกวมแล้ว

(ก) : แยกระบบ (ข) : รวมทุกระบบ

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ปราศจากคลื่นหลุดและค่าความกำกวมนั้นยังมีไบอัสของฮาร์ดแวร์หลงเหลืออยู่ จึงต้องนำค่านี้มาลบกับค่าไบอัสหน่วงเวลาของดาวเทียมที่คำนวณมาจาก DCB ได้ผลดังรูปที่ 4.4



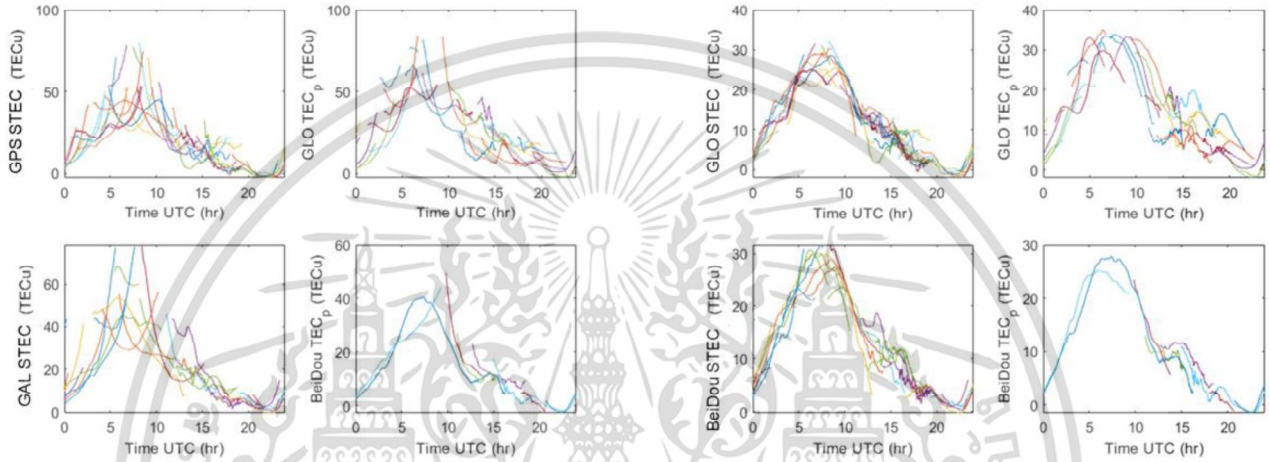
(ก) (ข)

รูปที่ 4.4 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ปราศจากที่แก้ไบอัสของดาวเทียมแล้ว

(ก) : แยกระบบ (ข) : รวมทุกระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่า เมื่อทำการแก้ไขไบอัสของดาวเทียมแล้ว ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ได้จากแต่ละระบบดาวเทียมนั้นจะมีอยู่ที่คนละระดับกัน (กล่าวคือแต่ละระบบมีการยกตัวของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ไม่เท่ากัน) โดยที่แต่ละระบบนั้นมีการยกตัวของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงที่ไม่เท่ากัน แต่ในระบบเดียวกันค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงจะเกาะกลุ่มกัน จึงต้องแยกค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียงของแต่ละระบบมาหาค่าไบอัสของเครื่องรับด้วยวิธีหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุดจะได้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิดังรูปที่ 4.5



(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แก้ไขไบอัสของเครื่องรับด้วยวิธีหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำสุด
(ก) : ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียง (ข) : ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้ง

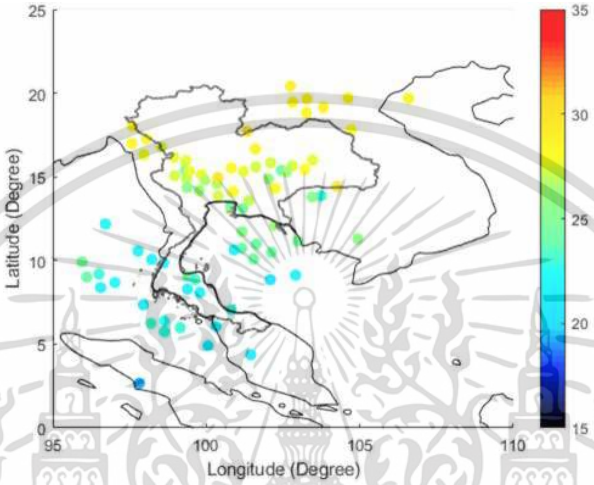
จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าเมื่อทำการแก้ไขไบอัสของของเครื่องรับ (ซึ่งรวมถึงไบอัสอื่นๆ ทั้งหมด) แล้วจะสามารถคำนวณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวเฉียง และคำนวณปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งได้จากสมการความสัมพันธ์ (Mapping function) พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิของทุกระบบจีเอ็นเอสเอส ในวันที่ 19 พฤศจิกายน 2563 (DOY 324) ที่ยกตัวอย่างนั้น ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากแต่ละระบบดาวเทียมนั้นล้วนเกิดความผิดปกติในเวลา 11 – 18 UTC เหมือนกัน จึงสามารถบอกได้ว่าหากชั้นบรรยากาศไอโอนสเฟียร์ผิดปกติทั่วน่านฟ้า ย่อมส่งผลต่อค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากแต่ละระบบจีเอ็นเอสเอสไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

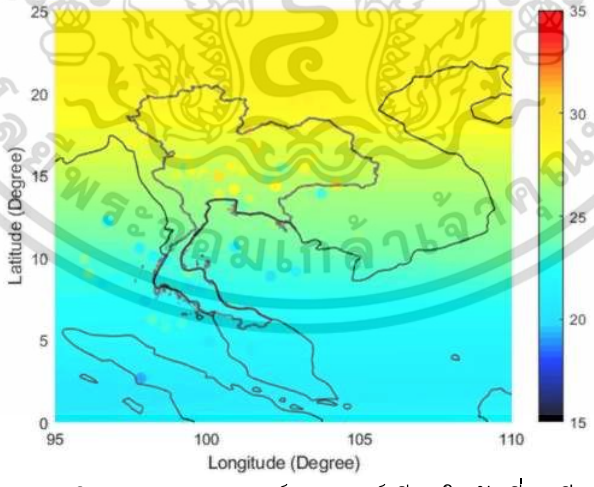
4.2.1 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากวิธี Thin plate spline ร่วมกับวิธีถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน

จากทฤษฎีการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กล่าวไปในบทที่ 3 เมื่อนำค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP ของทั้ง 19 สถานีจากระบบ GPS มาแสดงจะได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP ของสถานี KMIT ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC

จากรูปที่ 4.6 พบว่า การนำค่าจากทุกสถานีในประเทศไทยมาแสดงแบบกึ่งเรียลไทม์ จะได้จำนวนจุดของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ยังไม่ครอบคลุมทั่วทั้งแผนที่ โดยจะใช้วิธีการถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนในการประมาณค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากตำแหน่ง IPP ออกไปให้ครอบคลุมทั่วแผนที่ ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.7

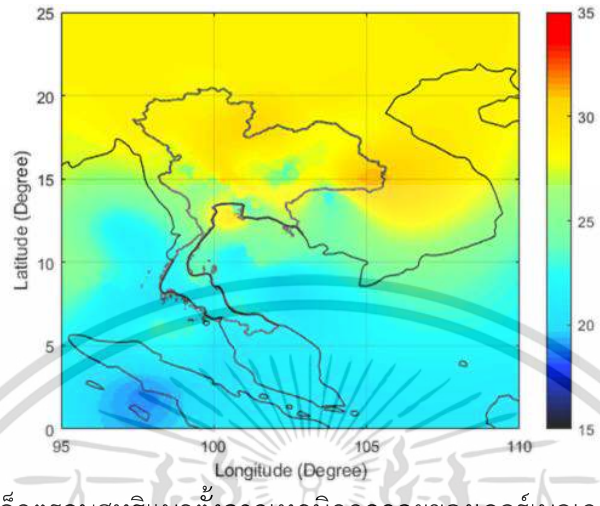


รูปที่ 4.7 smooth TEC จากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC

จากรูปที่ 4.7 แสดงแผนที่ของค่า smooth TEC จากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน(ส่วนพื้นหลัง)และ ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP ไว้ด้วยกัน โดยที่ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในตำแหน่ง IPP นั้นมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างกันกับ smooth TEC ไม่เกิน 3 TECu จากนั้นทำการใช้เทคนิค Thin plate spline ในการทำให้ smooth TEC มีค่าเข้าใกล้ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP



รูปที่ 4.8 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC

จากรูปที่ 4.8 พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ณ พิกัด IPP และปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับเทคนิค Thin plate spline มีความใกล้เคียงกันมาก ตัวแผนที่สามารถแสดงค่าความแปรปรวนได้ในช่วงพิกัดที่ 15 องศาละติจูด 103 องศาลองจิจูดและสามารถแสดงระดับของค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่มีการไล่ระดับกันตามแนวแกนละติจูด

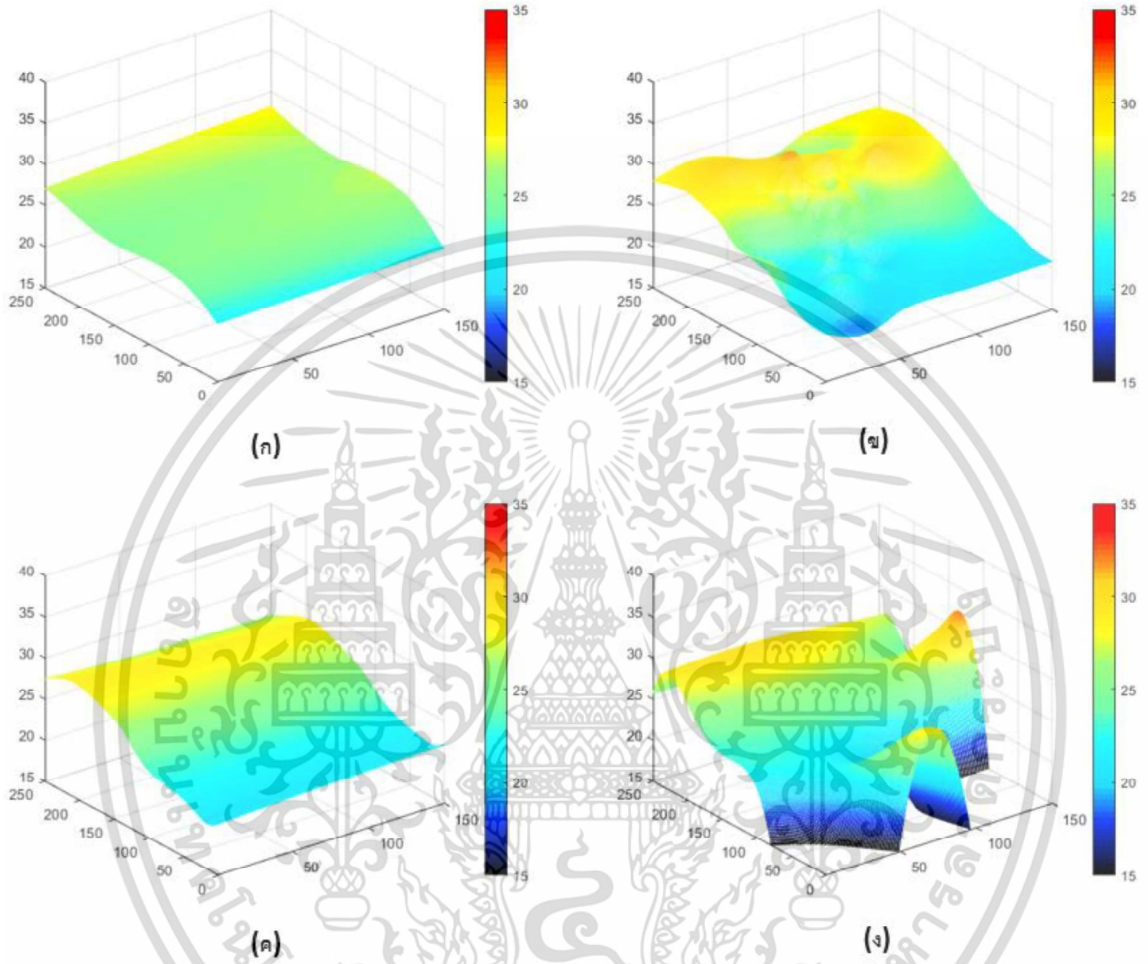
แต่เนื่องด้วยแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งนั้นสามารถแสดงระดับของแถบสีในหน่วย TECu ได้กว้าง (ในรูปคือ 15 ถึง 35 TECU) ซึ่งยากต่อการระบุสภาวะผิดปกติเนื่องจากมีค่าสีที่ใกล้เคียงกัน และในการระบุว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความผิดปกติจริงควรจะจริงที่ IPP เท่านั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีการพัฒนาต่อยอดเป็นการใช้สัญญาณจีเอ็นเอสเอสและได้นำเสนอเทคนิคในการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบกึ่งเรียลไทม์ด้วย Keogram ในหัวข้อที่ 4.3

4.2.2 Cross-validation เพื่อหา RMSE ของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในขณะกึ่งเรียลไทม์

ในการทดสอบแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะใช้เทคนิค Cross-validation เนื่องจากแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้สร้างจากค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริง จึงต้องแบ่งสถานีออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มละ 9 สถานีโดยให้กลุ่มแรกชื่อ GROUP-A และ กลุ่มที่สองคือ GROUP-B ในการสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและใช้ข้อมูลในแต่ละกลุ่มมาสร้างแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC ซึ่ง GROUP-A ใช้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ IPP ทั้งหมด 43 จุดและ GROUP-B 40 จุด และเปรียบเทียบกับการใช้จุดทั้ง 83 จุด เปรียบเทียบกับเทคนิคที่นำเสนอ และจากเทคนิค Adjusted Spherical harmonic ในงานก่อนหน้า จากนั้นหาค่าผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) ของแผนที่ปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่คำนวณได้จากเครื่องรับ ณ จุด IPP โดยแสดงด้วยพิกัดกริดแบบสามมิติได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.9 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (แสดงค่าด้วยความสูงและสี) ในวันที่ 4 มีนาคม ปี 2563 ในเวลา 6.30 UTC

(ก) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจาก CODE

(ข) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline

(ค) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจากเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน (ง) แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจาก Adjusted Spherical harmonic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 Cross-validation เพื่อหา RMSE ของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างขึ้นกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จุด IPP ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC

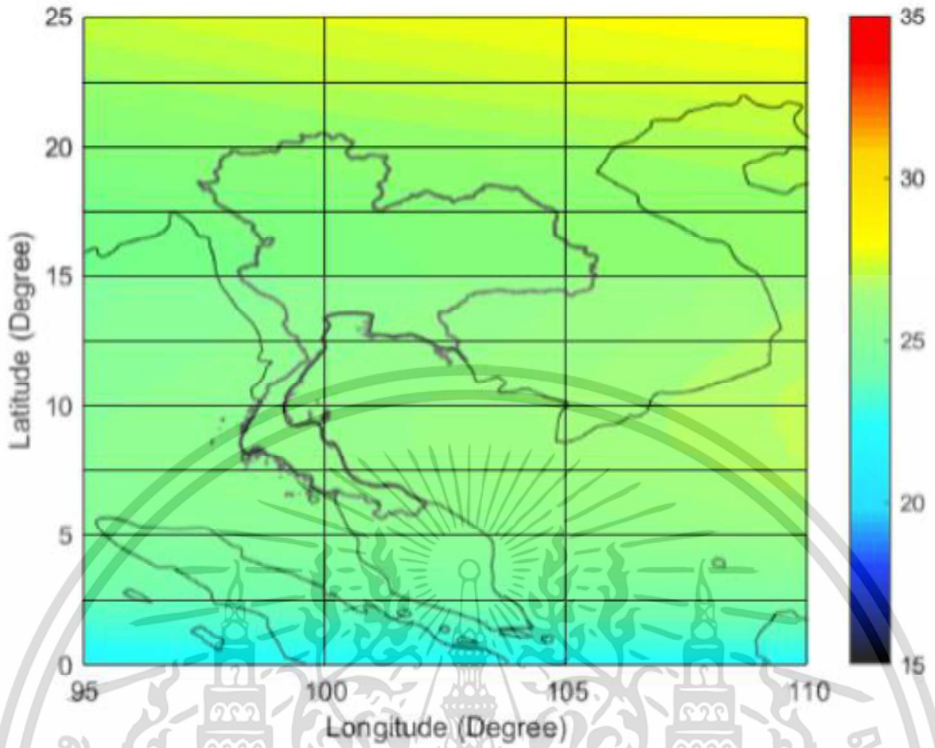
สถานี	เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน	เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline	เทคนิค Adjusted Spherical harmonic
Group-A (43 IPP)	1.4989	1.3143	1.5011
Group-B (40 IPP)	1.2785	1.2376	1.4817
All stations (83 IPP)	1.1917	0.3263	0.8156

จากตารางที่ 4.1 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิของ Group-A และ Group-B จะมีค่า RMSE มากกว่าการใช้สถานีทั้งหมด และการใช้เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline ที่นำเสนอ มีค่า RMSE ที่ต่ำที่สุดเมื่อใช้สถานีทั้งหมดในการสร้างแผนที่ จากรูปที่ 4.9 การที่ RMSE ของเทคนิค Adjusted Spherical harmonic ในงานก่อนหน้านั้นมีค่าสูงกว่า เกิดขึ้นเนื่องจากการประมาณด้วย ASHM จะไม่แม่นยำมากนักในจุดที่ไกลจาก IPP โดยเมื่อคิด RMSE ของทั้งแผนที่ด้วยการทำ Cross-validation ค่าของการผิดพลาดที่ขอบแผนที่จึงถ่วงน้ำหนักให้ RMSE มีค่ามาก

4.2.3 ความแตกต่างของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างเทียบกับแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจาก CODE

ในการเปรียบเทียบแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งที่สร้างขึ้นกับแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิศูนย์การกำหนดวงโคจรในยุโรป (Center for Orbit Determination in Europe: CODE) ตัวอย่างของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจาก CODE แสดงดังรูปที่ 4.10 โดยในการเปรียบเทียบนั้นจะใช้ค่า correlation ร่วมกับ RMSE โดยจะคำนวณจากค่าที่กริดของ CODE ซึ่งมีขนาด 2.5x5 องศากับตำแหน่งกริดเดียวกันของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างในวันที่ 4 มีนาคม 2563 (ทั้งวัน) ได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแนวตั้งจาก CODE ในวันที่ 4 มีนาคม 2563 เวลา 6.30 UTC

ตารางที่ 4.2 ค่า RMSE เฉลี่ยของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กริดของ CODE ในวันที่ 4 มีนาคม 2563

สถานี	เทคนิคฉดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน	เทคนิคฉดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline	เทคนิค Adjusted Spherical harmonic
Group-A (43 IPP)	1.9561	1.5914	3.4412
Group-B (40 IPP)	1.7122	2.1632	3.1640
All stations (83 IPP)	1.3579	1.2931	2.5356

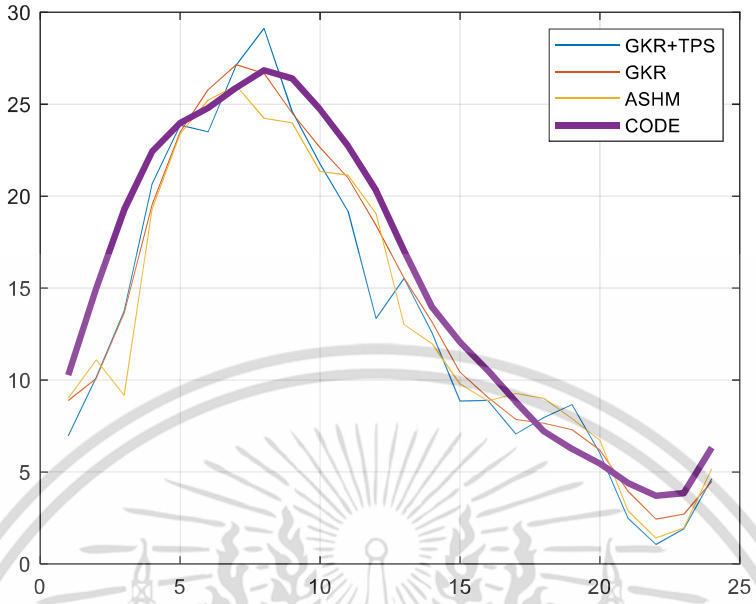
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่า Correlation เฉลี่ยของแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่สร้างกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่กริดของ CODE ในวันที่ 4 มีนาคม 2563

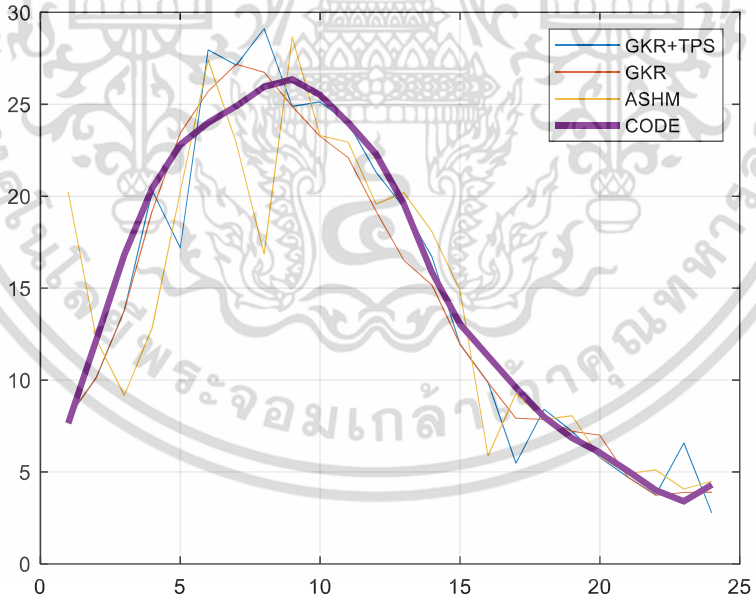
สถานี	เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน	เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline	เทคนิค Adjusted Spherical harmonic
Group-A (43 IPP)	0.6678	0.5914	0.3720
Group-B (40 IPP)	0.7188	0.6132	0.3371
All stations (83 IPP)	0.7425	0.6987	0.4356

จากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า Correlation เฉลี่ยในหนึ่งวันของเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนนั้นจะใกล้เคียงกับ CODE ที่สุดเนื่องจากค่านั้นค่อนข้างราบเรียบ รองลงมาคือเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline ที่นำเสนอ และเทคนิค Adjusted Spherical harmonic ในงานก่อนหน้านั้นมีค่า Correlation ของทั้งแผนที่น้อยเกิดขึ้นเนื่องจากการประมาณค่าแบบ ASHM จะไม่แม่นยำมากนักในจุดที่ไกลจาก IPP โดยเมื่อคิด Correlation ของทั้งแผนที่ในหนึ่งวัน ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ขอบแผนที่จากเทคนิค ASHM นั้นจึงทำให้ค่า Correlation ที่น้อยกว่า โดยตัวอย่างการเปรียบเทียบแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิกับแผนที่ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจาก CODE ในพิกัดกริดที่ใกล้กับ IPP จะเปรียบเทียบที่ตำแหน่ง 15 องศาละติจูด และ 100 องศาลองจิจูดได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.11 และตัวอย่างในพิกัดกริดที่ขอบของแผนที่ที่ใกลกับ IPP จะอยู่ที่ตำแหน่ง 15 องศาละติจูด และ 95 องศาลองจิจูดได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 4 มีนาคม 2563 ที่ตำแหน่งกริด 15 องศาละติจูด และ 100 องศาลองจิจูด



รูปที่ 4.12 ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 4 มีนาคม 2563 ที่ตำแหน่งกริด 15 องศาละติจูด และ 95 องศาลองจิจูด

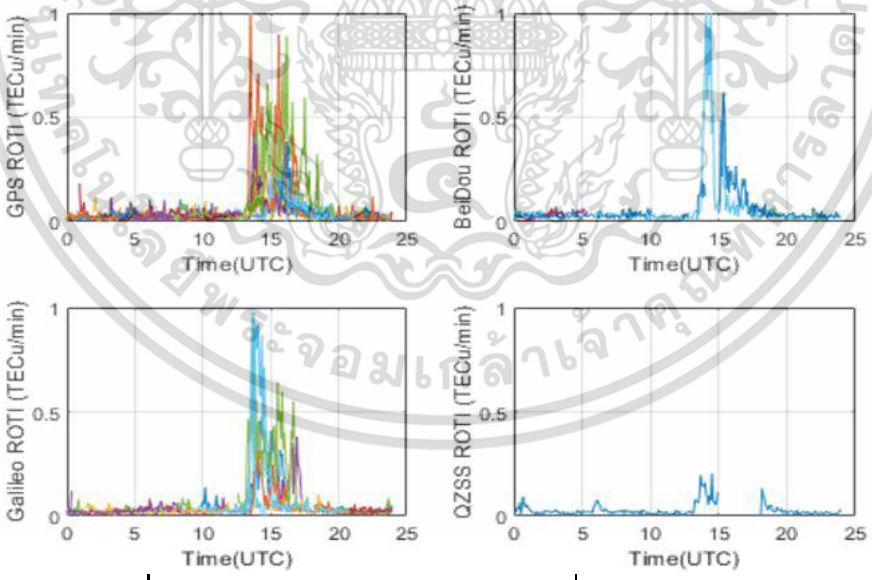
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 GKR หมายถึงเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน TPS หมายถึง Thin plate spline และ ASHM หมายถึง Adjusted Spherical harmonic พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในบริเวณที่ใกล้กับจุด IPP ที่ตำแหน่งกริด 15 องศาละติจูด และ 100 องศาลองจิจูดนั้น ทั้งวิธีเทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน, เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียนร่วมกับ Thin plate spline และ ASHM นั้นต่างก็ให้ค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่มีแนวโน้มในลักษณะเดียวกันกับ CODE และจากรูปที่ 4.12 พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในบริเวณขอบของแผนที่ที่ห่างไกลกับกลุ่มของจุด IPP ที่ตำแหน่งกริด 15 องศาละติจูด และ 100 องศาลองจิจูดนั้น วิธี ASHM จะมีความแปรปรวนที่มากกว่า

4.3 ผลการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ในการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะคำนวณจากสัญญาณดาวเทียมเอ็นเอสเอสวงโคจรระดับกลาง ซึ่งทำให้ได้จำนวนของดาวเทียมที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 50% ของการใช้ระบบ GPS เพียงระบบเดียว โดยในการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะเปรียบเทียบข้อมูลตัวอย่างในปี 2563 – 2564 ในวันที่เกิดและไม่เกิดความผิดปกติจากการพิจารณาจากค่า ROTI โดยจะทำการสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิและภาพ Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และทำการหาลักษณะการเคลื่อนที่ของความผิดปกติที่จุด IPP

4.3.1 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 18 มีนาคม 2563

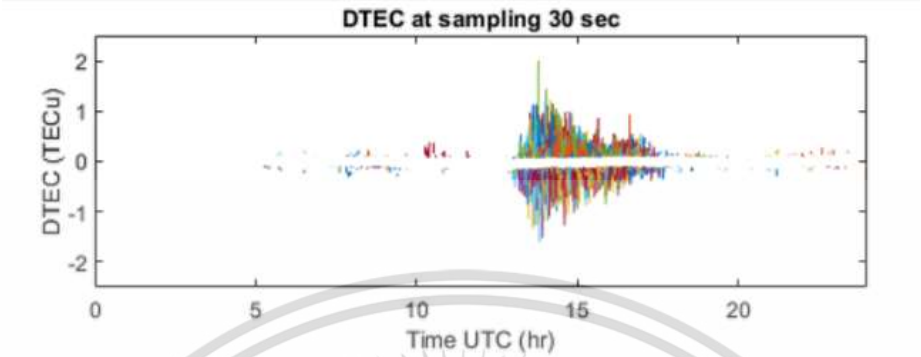


รูปที่ 4.13 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 18 มีนาคม 2563

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่า ROTI มีความแปรปรวน ณ เวลา 12.00 – 18.00 UTC โดยที่ระบบดาวเทียม GPS, Galileo และ BeiDou ต่างก็พบความผิดปกตินี้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

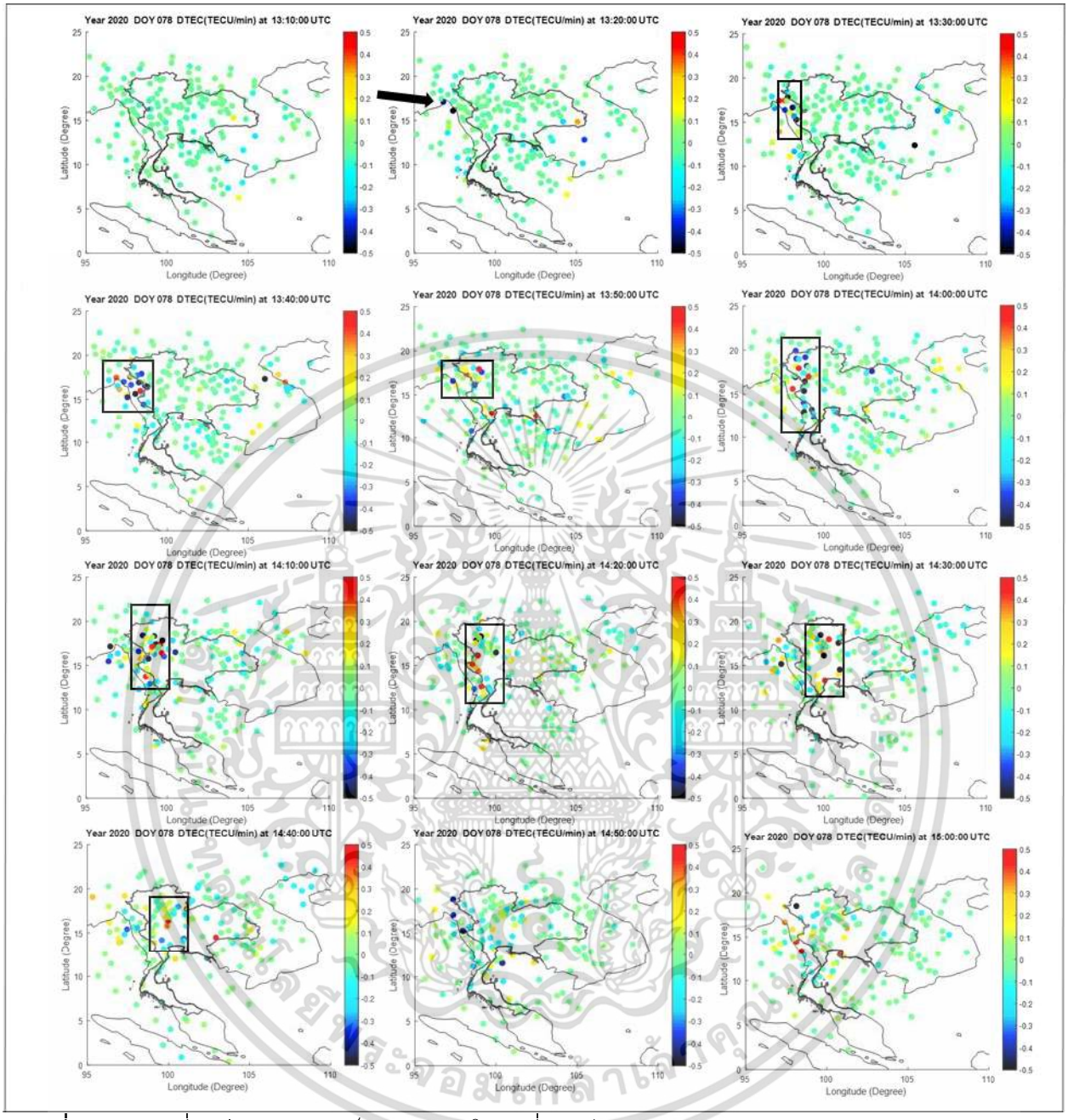
ทำการหาค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลา 30 วินาทีและนำมากรองด้วยการตั้ง เกณฑ์การตัดสินใจดังที่นำเสนอในหัวข้อ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 18 มีนาคม 2563

จากรูปที่ 4.14 พบว่า ณ เวลา 12.00 – 18.00 UTC ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิต่างเกิดความแปรปรวนขึ้น มีการแกว่งขึ้นลงในกรอบที่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจที่ตั้งเอาไว้ และในช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สงบค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิก็ไม่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจมากนัก นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ได้ผลดังรูปที่ 4.15

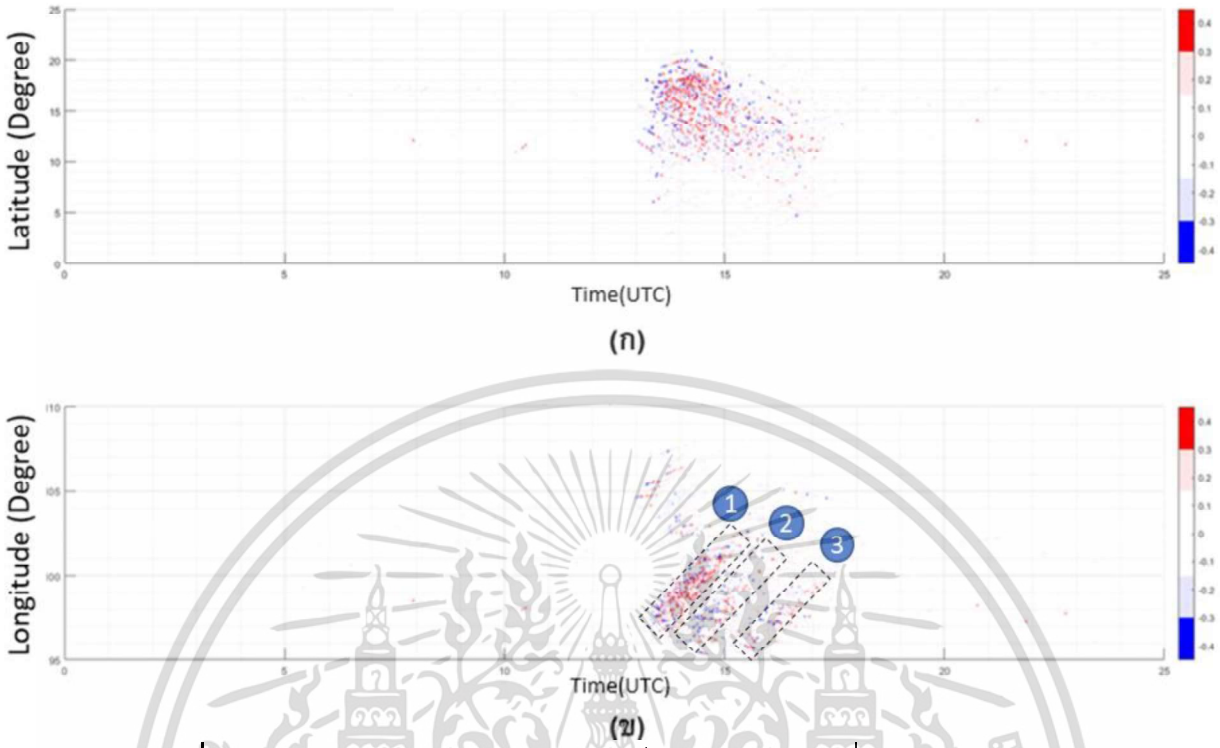
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 18 มีนาคม 2563 เวลา 13.10 – 15.00 UTC ทุก 10 นาที

จากรูปที่ 4.15 พบว่าที่เวลา 13.20 UTC เริ่มมีความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้น (พิจารณาจากจุดสีแดงและน้ำเงินเป็นหลัก ซึ่งแสดงถึงความแปรปรวนของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์) ที่ละติจูดมากกว่า 10 องศาและลองจิจูด 96 องศาและค่อยๆเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือและจางหายไปในเวลา 15.00 UTC จากผลลัพธ์นี้ทดลองมองในมุมของ Keogram ดังรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

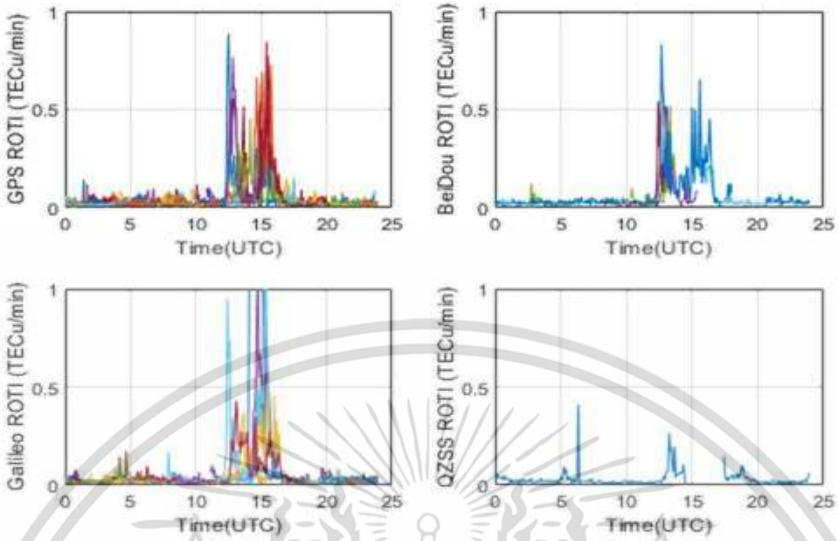


รูปที่ 4.16 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 18 มีนาคม 2563
(ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด

จากรูปที่ 4.16 พบว่าค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงใน Keogram เกิดการลดลงก่อนจากนั้นเพิ่มขึ้นและสลับตัวลดลงและเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา 13.00 – 17.00 UTC ในรูป (ก) พบว่าโดยมากค่าความผิดปกติจะเกิดที่ละติจูดมากกว่า 8 องศา ในรูป (ข) พบว่าในแนวแกนลองจิจูดมีการเคลื่อนที่ของความผิดปกตินี้อย่างชัดเจนในแนวตะวันออกสามครั้ง โดยเริ่มจากลองจิจูดที่ 95 ไปจนถึง 103 โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนลองจิจูด (ความชัน) 1.4945 องศา/ชั่วโมง ถ้าให้ละติจูดคงที่เท่ากับ 15 องศา 1 ลองจิจูดจะมีค่า 107 กิโลเมตร คิดเป็นความเร็วในแนวตะวันออกประมาณ 160 กิโลเมตร/ชั่วโมง (44 เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

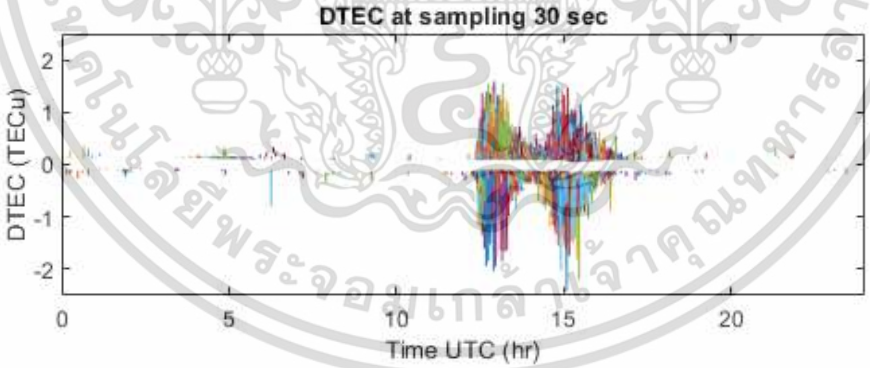
4.3.2 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563



รูปที่ 4.17 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563

จากรูปที่ 4.17 พบว่าค่า ROTI มีความแปรปรวน ณ เวลา 12.00 – 17.00 UTC โดยที่ระบบดาวเทียม GPS, Galileo และ BeiDou ต่างก็พบความผิดปกตินี้เช่นกัน โดยพบว่าค่า ROTI มีความแปรปรวนเกิดขึ้นสองครั้ง ครั้งแรกในเวลา 12.00 – 13.00 UTC และสงบลงจากนั้นครั้งที่สองในเวลา 14.00 – 16.00 UTC

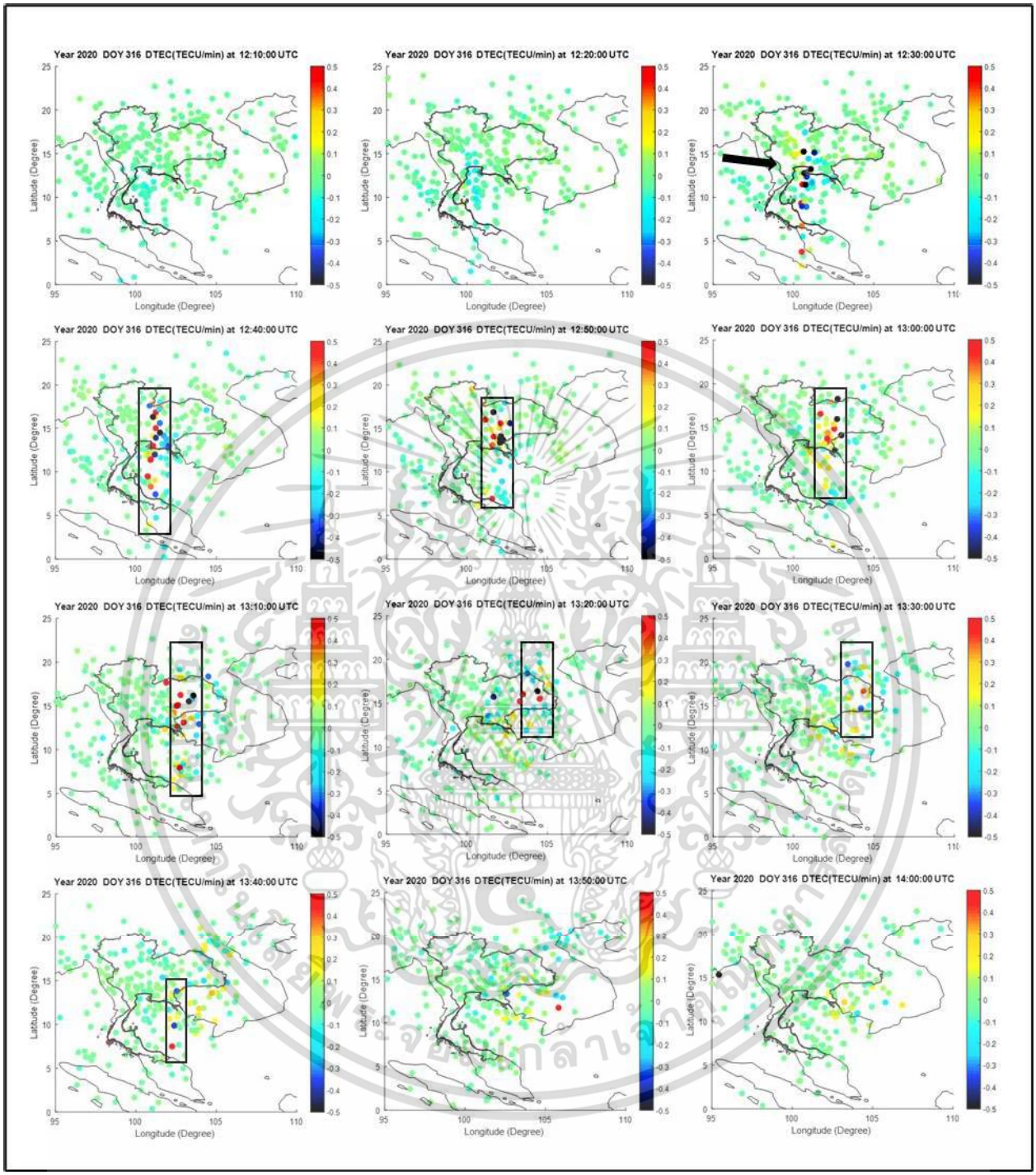
ทำการหาค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลา 30 วินาทีและนำมากรองด้วยการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจดังที่นำเสนอในหัวข้อ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.18



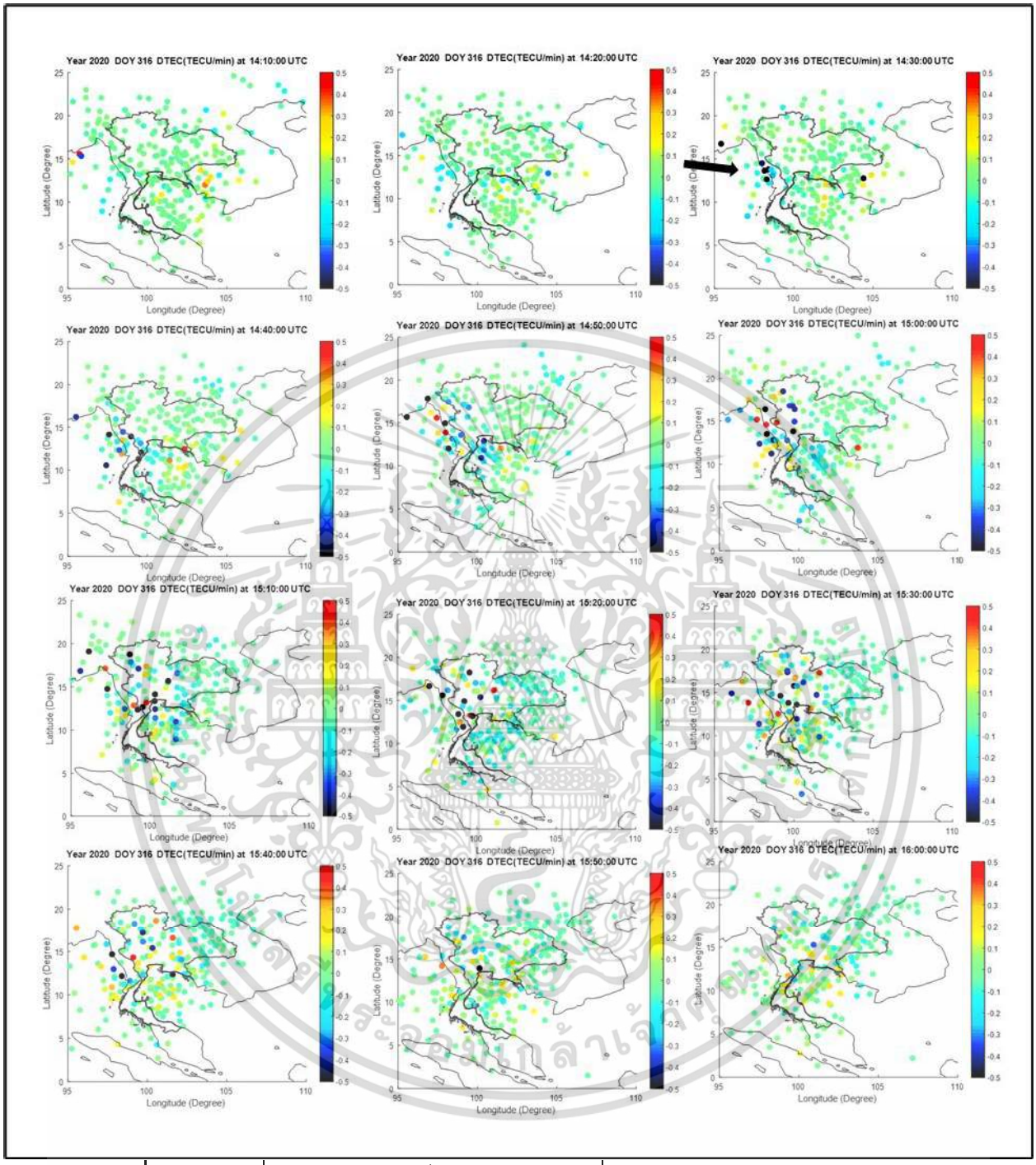
รูปที่ 4.18 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563

จากรูปที่ 4.18 พบว่า ณ เวลา 12.00 – 13.00 UTC ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิต่างเกิดความแปรปรวนขึ้นครั้งแรก และครั้งที่สองในเวลา 14.00 – 16.00 UTC มีการแกว่งขึ้นลง ในกรอบที่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจที่ตั้งเอาไว้ และในช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สงบค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิก็ไม่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจมากนัก นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิได้ผลดังรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

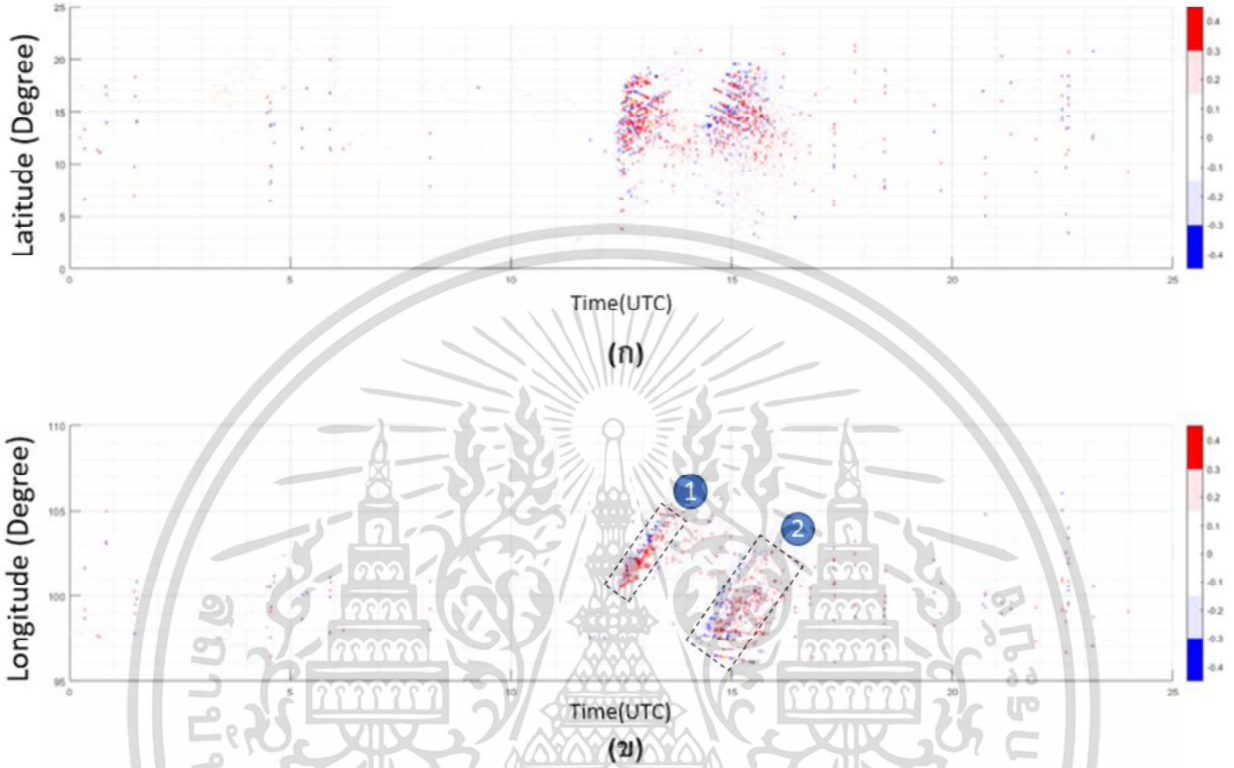


รูปที่ 4.19 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563 ทุก 10 นาที

จากรูปที่ 4.19 พบว่าที่เวลา 12.10 - 13.40 UTC เริ่มมีความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นที่ลองจิจูด 100 และค่อยๆเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ จากนั้นค่อยๆเลือนหายไป และในเวลา 14.20 –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16.00 UTC ได้มีความผิดปกติกระจายตัวในวงกว้าง ครอบคลุมละติจูดระหว่าง 5 – 20 องศา และลองจิจูดที่ 96 – 103 องศาจากผลลัพธ์นี้ทดลองมองในมุมของ Keogram ได้ดังรูปที่ 4.20

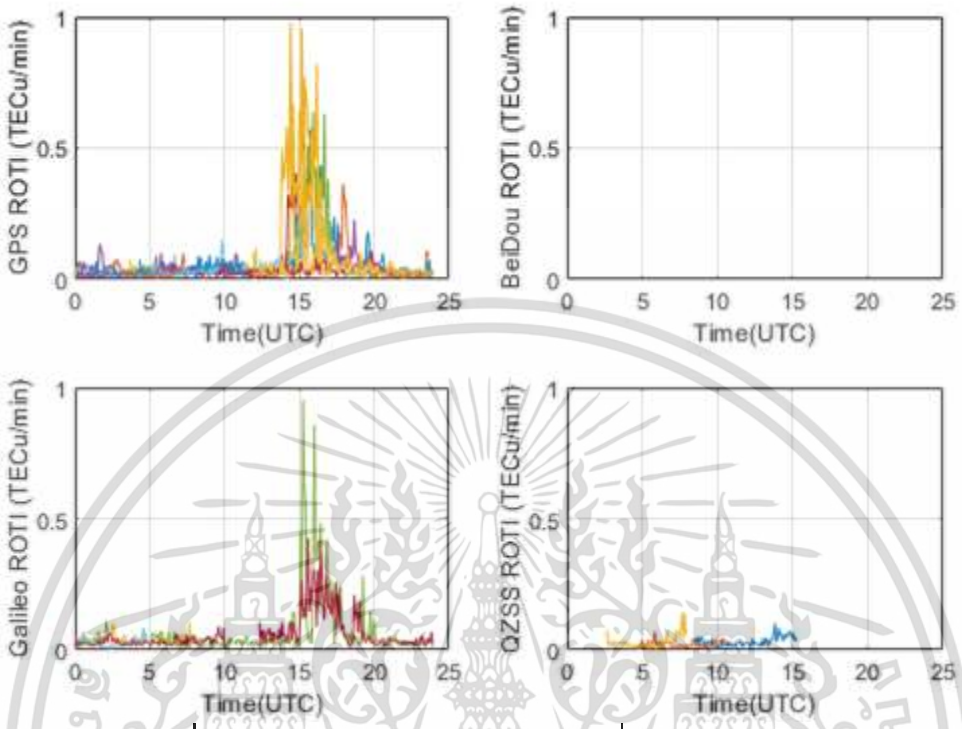


รูปที่ 4.20 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 11 พฤศจิกายน 2563 (ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด

จากรูปที่ 4.20 พบว่าเกิดความผิดปกติขึ้นสองครั้ง ครั้งแรกในเวลา 12.10 – 13.40 UTC และครั้งที่สองในเวลา 14.20 – 16.00 UTC ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงใน Keogram เกิดการลดลงก่อนจากนั้นเพิ่มขึ้นเหมือนกันทั้งสองครั้ง ในรูป (ก) พบว่าโดยมากค่าความผิดปกติจะเกิดที่ละติจูดมากกว่า 8 องศา ในรูป (ข) พบว่าในครั้งแรกที่แนวแกนลองจิจูดมีการเคลื่อนที่ของความผิดปกตินี้อย่างชัดเจนในแนวตะวันออก โดยเริ่มจากลองจิจูดที่ 100.5 ไปจนถึง 105 โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนลองจิจูด (ความชัน) 1.887 องศา/ชั่วโมง ถ้าให้ละติจูดคงที่เท่ากับ 15 องศา 1 ลองจิจูดจะมีค่า 107 กิโลเมตร คิดเป็นความเร็วในแนวตะวันออกประมาณ 203 กิโลเมตร/ชั่วโมง (56.4 เมตร/วินาที) และในครั้งที่สองเกิดความผิดปกติแบบกระจายตัวทั้งในแนวละติจูดและลองจิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

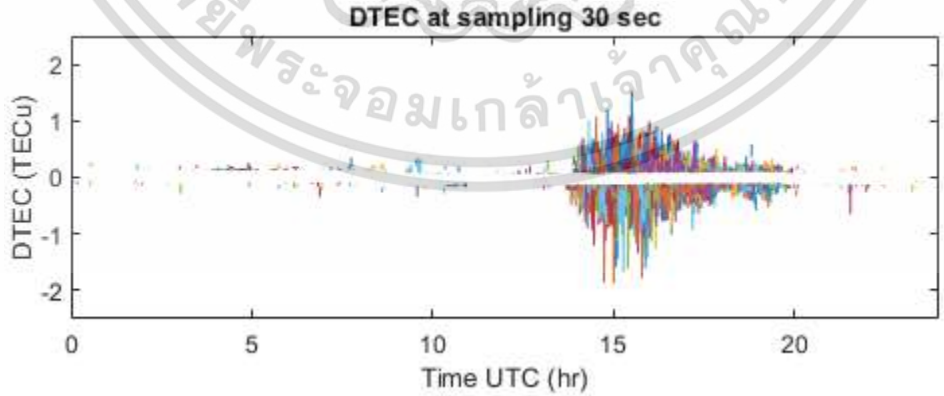
4.3.3 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 17 มีนาคม 2564



รูปที่ 4.21 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 17 มีนาคม 2564

จากรูปที่ 4.21 พบว่าค่า ROTI มีความแปรปรวน ณ เวลา 12.00 – 18.00 UTC โดยที่ระบบดาวเทียม GPS และ Galileo ต่างก็พบความผิดปกตินี้เช่นกัน

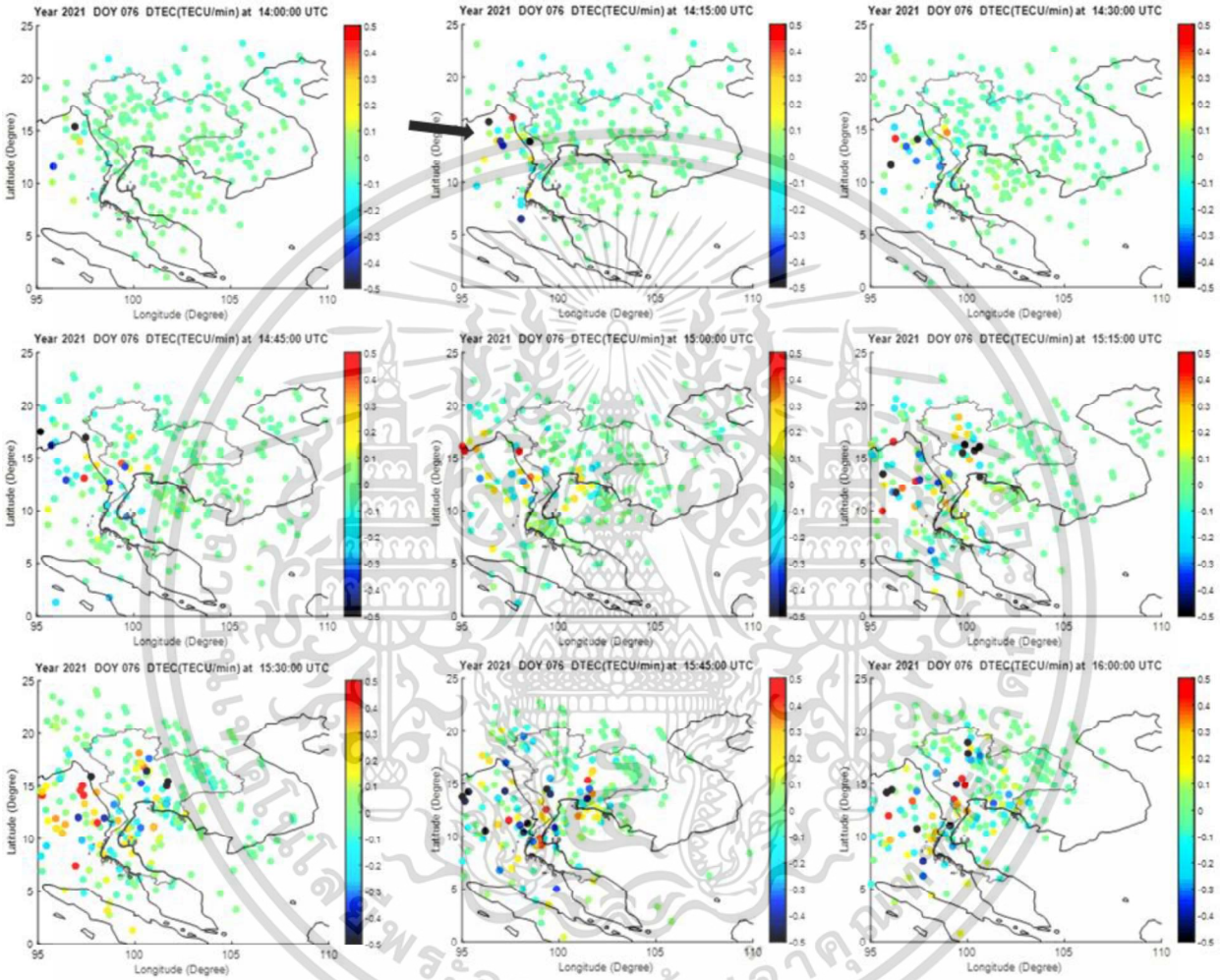
ทำการหาค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลา 30 วินาทีและนำมากรองด้วยการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจดังที่นำเสนอในหัวข้อ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 17 มีนาคม 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

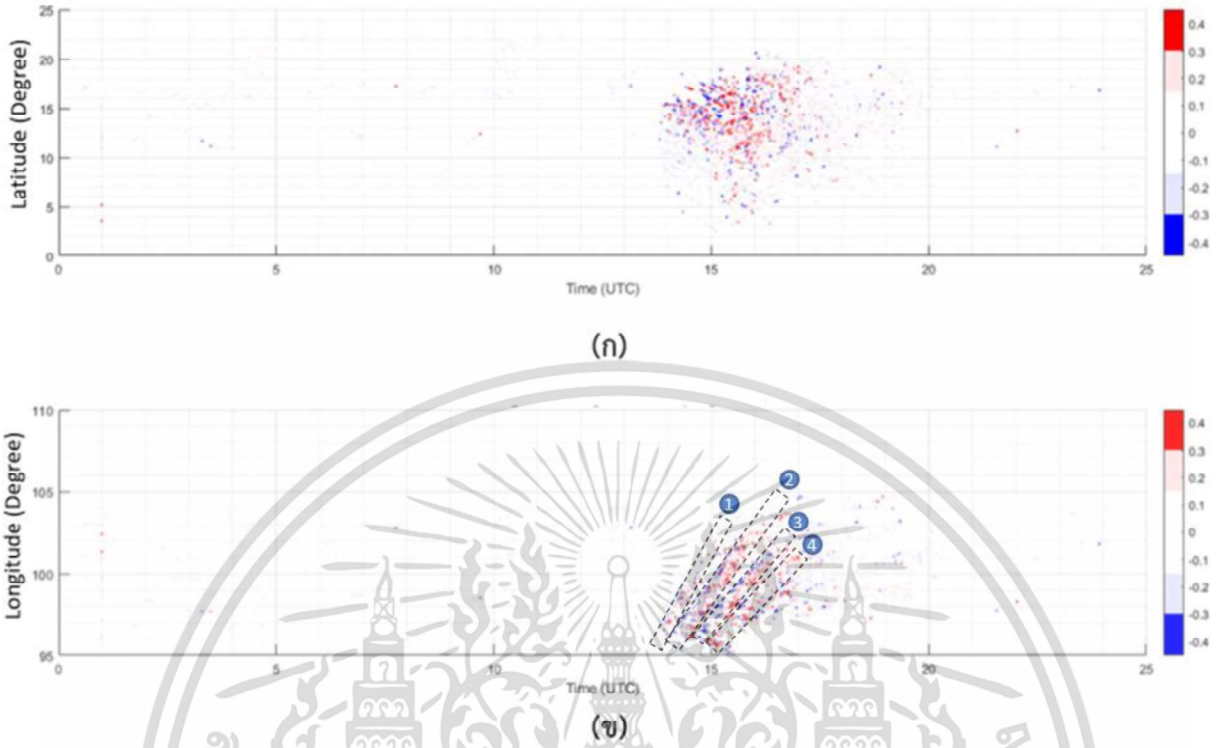
จากรูปที่ 4.22 พบว่า ณ เวลา 13.00 – 20.00 UTC ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิต่างเกิดความแปรปรวนขึ้น มีการแกว่งขึ้นลง ในกรอบที่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจที่ตั้งเอาไว้ และในช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สงบค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิก็ไม่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจมากนัก นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ได้ผลดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 17 มีนาคม 2564 ทุก 15 นาที

จากรูปที่ 4.23 พบว่ามีความผิดปกติกระจายตัวเป็นวงกว้าง โดยที่เวลา 14.00 - 14.45 UTC เริ่มมีความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นที่ลองจิจูด 97 องศาและค่อยๆเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเป็นกลุ่มและจางหายไปเมื่อลองจิจูด 105 องศา จากผลลัพธ์นี้ทดลองมองในมุมของ Keogram ได้ดังรูปที่ 4.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

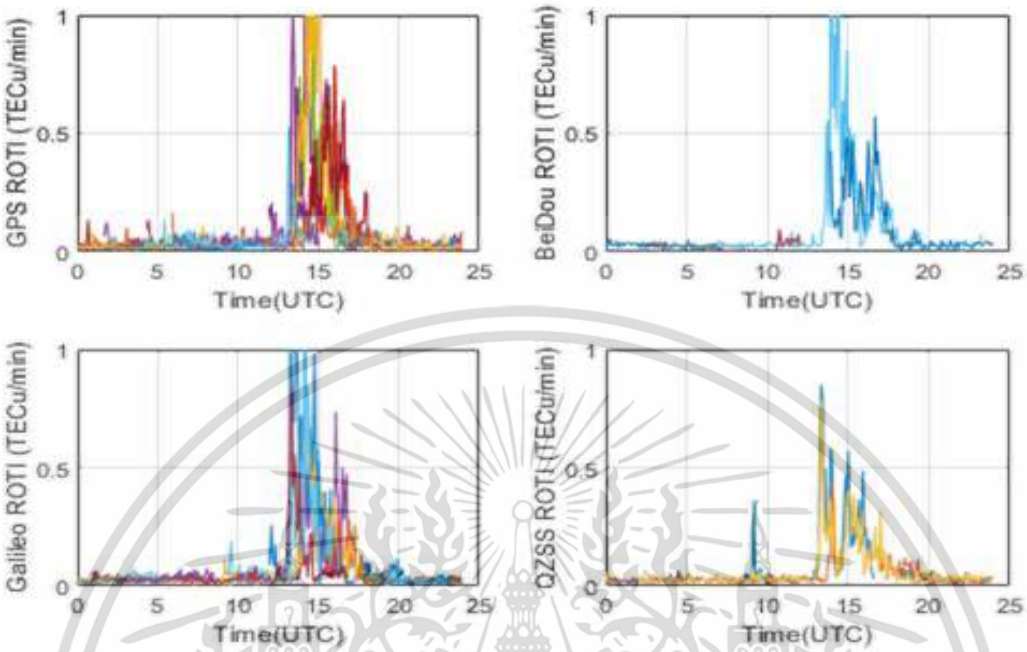


รูปที่ 4.24 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 17 มีนาคม 2564
(ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด

จากรูปที่ 4.24 พบว่าเกิดความผิดปกติขึ้นอย่างชัดเจนในเวลา 13.00 – 20.00 UTC โดยค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงใน Keogram เกิดการลดลงก่อน จากนั้นเพิ่มขึ้นสลับกับลดลงและเพิ่มขึ้นรวม 4 ครั้ง ในรูป (ก) พบว่าค่าความผิดปกติเกิดที่ละติจูด 3 - 21 องศา ในรูป (ข) พบว่าที่แนวแกนลองจิจูดมีการเคลื่อนที่ของความผิดปกตินี้อย่างชัดเจนในแนวตะวันออก ด้วยความชันที่ไม่คงที่ โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนลองจิจูด (ความชัน) 2.1300, 1.7434, 1.5557, 1.4663 องศา/ชั่วโมง ตามลำดับ ถ้าให้ละติจูดคงที่เท่ากับ 15 องศา 1 ลองจิจูดจะมีค่า 107 กิโลเมตร คิดเป็นความเร็วในแนวตะวันออกประมาณ 229, 187, 167, 157 กิโลเมตร/ชั่วโมง (63.6162, 51.9486, 46.3926, 43.6146 เมตร/วินาที) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

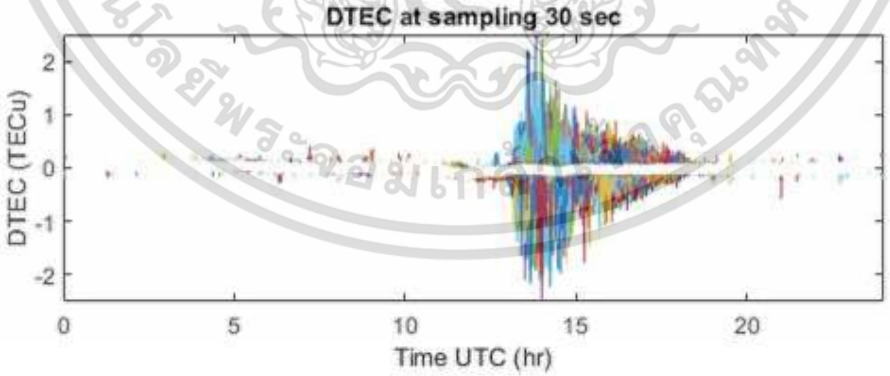
4.3.4 ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวันที่ 25 มีนาคม 2564



รูปที่ 4.25 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 25 มีนาคม 2564

จากรูปที่ 4.25 พบว่าค่า ROTI มีความแปรปรวน ณ เวลา 12.00 – 18.00 UTC โดยที่ระบบดาวเทียม GPS, Galileo BeiDou และ QZSS ต่างก็พบความผิดปกตินี้เช่นกัน

ทำการหาค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลา 30 วินาทีและนำมากรองด้วยการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจดังที่นำเสนอในหัวข้อ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.26

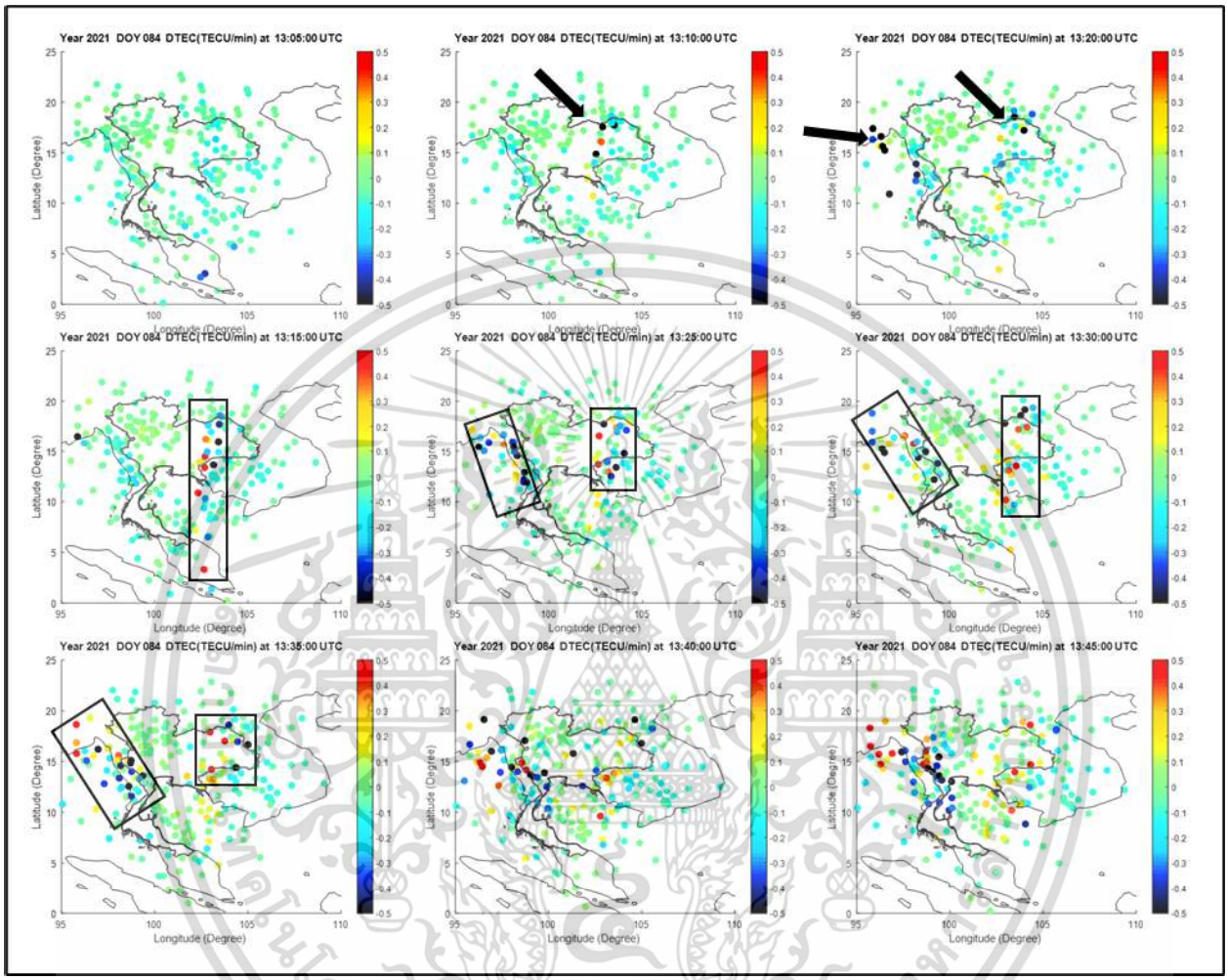


รูปที่ 4.26 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564

จากรูปที่ 4.26 พบว่า ณ เวลา 12.00 – 18.00 UTC ค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิต่างเกิดความแปรปรวนขึ้น มีการแกว่งขึ้นลง ในกรอบที่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจที่ตั้งเอาไว้ และในช่วงเวลาที่ชั้นบรรยากาศไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

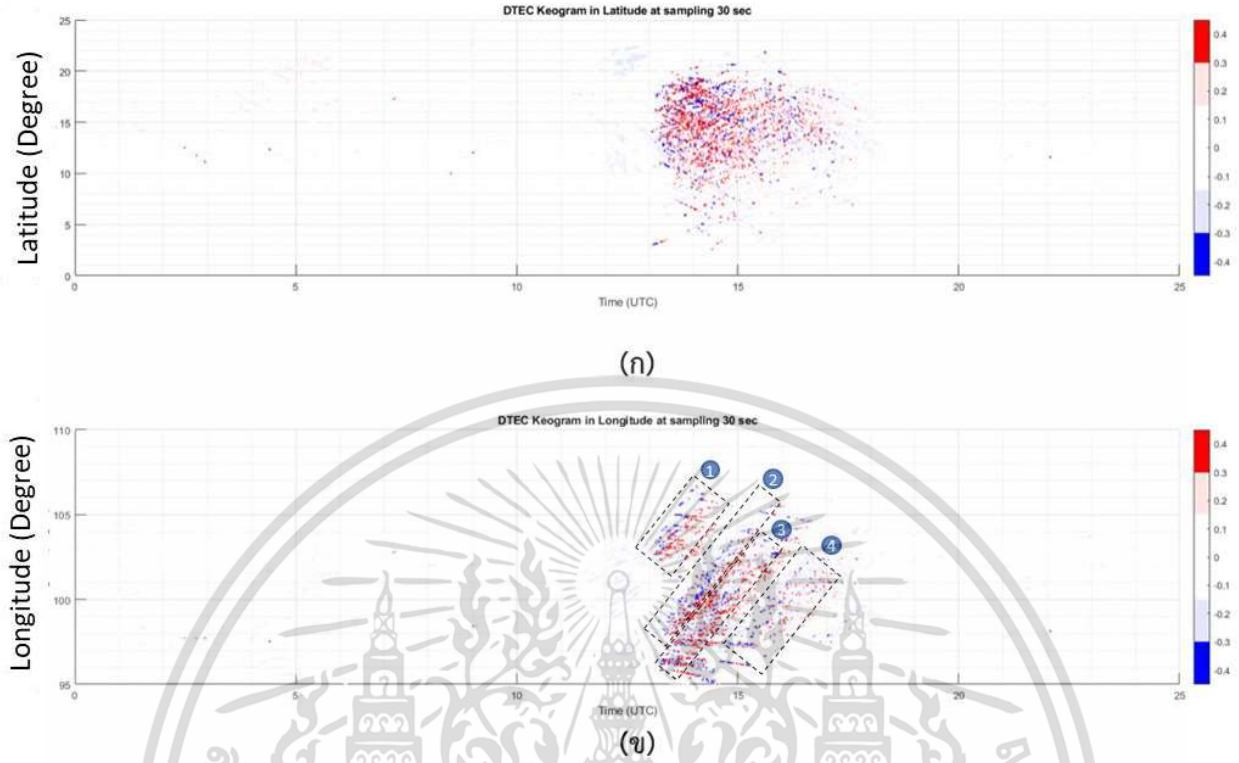
โอโนสเฟียร์สงบค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิก็ไม่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจมากนัก นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ได้ผลดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564 ทุก 5 นาที

จากรูปที่ 4.27 พบว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นสองแห่ง โดยที่เวลา 13.05 - 13.45 UTC เริ่มมีความผิดปกติของชั้นไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นที่ลองจิจูด 102.5 องศาและค่อยๆเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ จากนั้นค่อยๆเลือนหายไป และในเวลา 13.15 ได้มีความผิดปกติกระจายตัวในวงกว้าง ที่ลองจิจูด 96 องศา จากผลลัพธ์นี้ทดลองมองในมุมของ Keogram ได้ดังรูปที่ 4.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

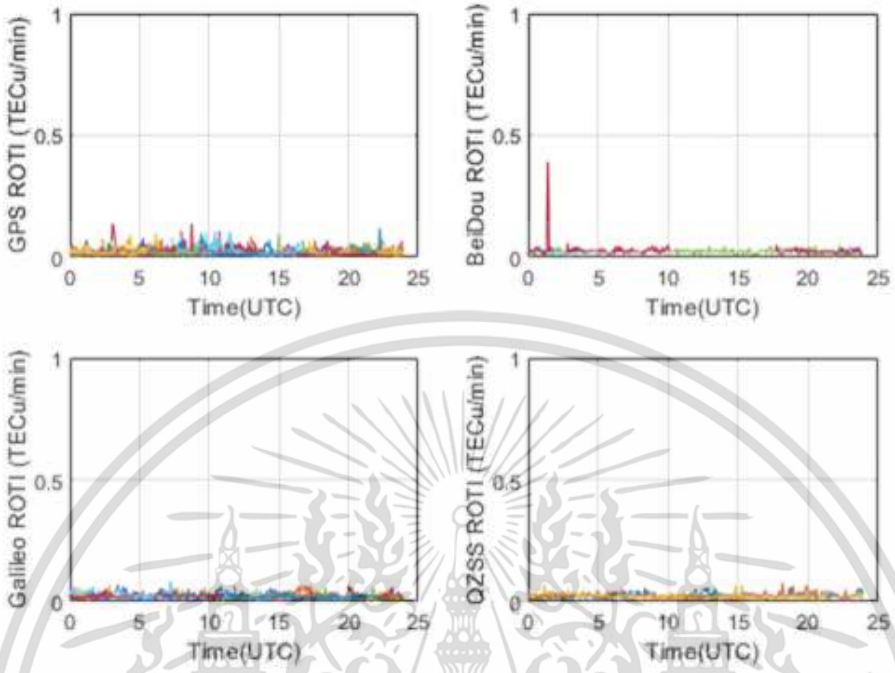


รูปที่ 4.28 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564
(ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด

จากรูปที่ 4.28 พบว่าเกิดความผิดปกติขึ้นอย่างชัดเจนในเวลา 13.00 – 17.00 UTC โดยค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงใน Keogram เกิดการลดลงก่อน จากนั้นเพิ่มขึ้นสลับกับลดลงและเพิ่มขึ้นรวม 4 ครั้ง ในรูป (ก) พบว่าค่าความผิดปกติเกิดที่ละติจูด 3 – 21 องศา ในรูป (ข) พบว่าในครั้งแรกที่แนวแกนลองจิจูดมีการเคลื่อนที่ของความผิดปกตินี้อย่างชัดเจนในแนวตะวันออก โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงในแนวแกนลองจิจูด (ความชัน) 1.5890 องศา/ชั่วโมง ถ้าให้ละติจูดคงที่เท่ากับ 15 องศา 1 ลองจิจูดจะมีค่า 107 กิโลเมตร คิดเป็นความเร็วในแนวตะวันออกประมาณ 171 กิโลเมตร/ชั่วโมง (47.5038 เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

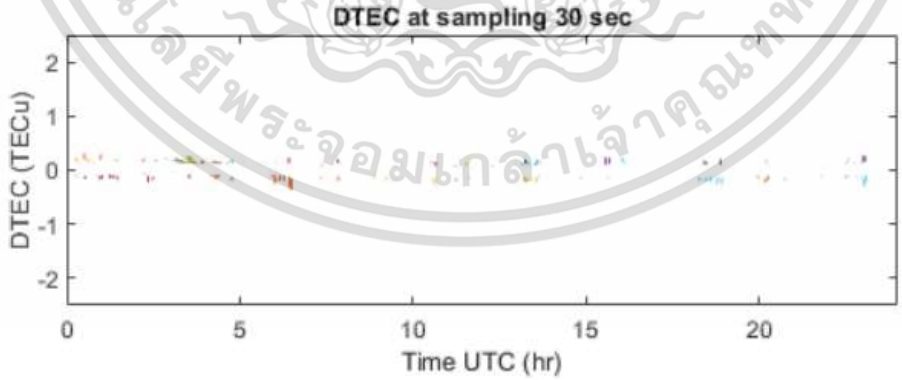
4.3.5 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สงบในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564



รูปที่ 4.29 ROTI ของสถานี KMITL ในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564

จากรูปที่ 4.29 พบว่าค่า ROTI มีความสงบตลอดทั้งวัน โดยที่ระบบดาวเทียม BeiDou มีค่า ROTI ที่พีคขึ้นมาจังหวะหนึ่งที่เวลา 1.00 UTC ซึ่งอาจเกิดจากข้อผิดพลาดทางฮาร์ดแวร์

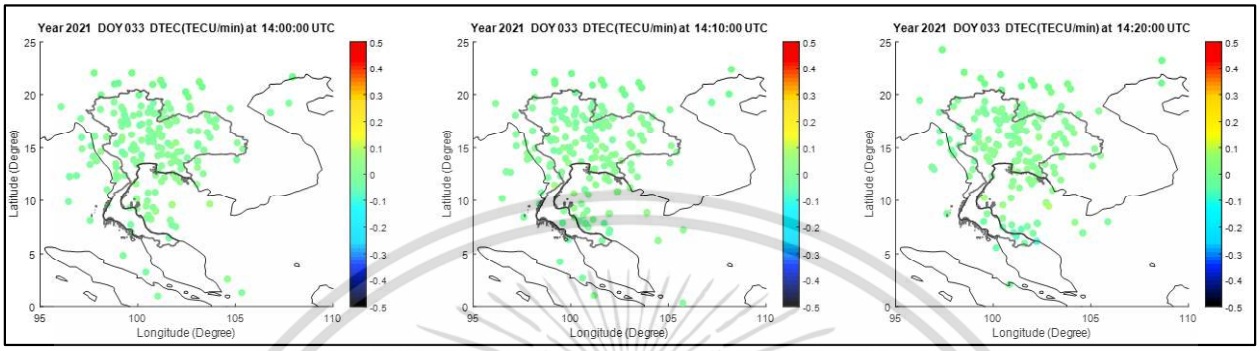
ทำการหาค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลา 30 วินาทีและนำมากรองด้วยการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจดังที่นำเสนอในหัวข้อ 3.3 ได้ผลดังรูปที่ 4.30 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564



รูปที่ 4.30 ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 25 มีนาคม 2564

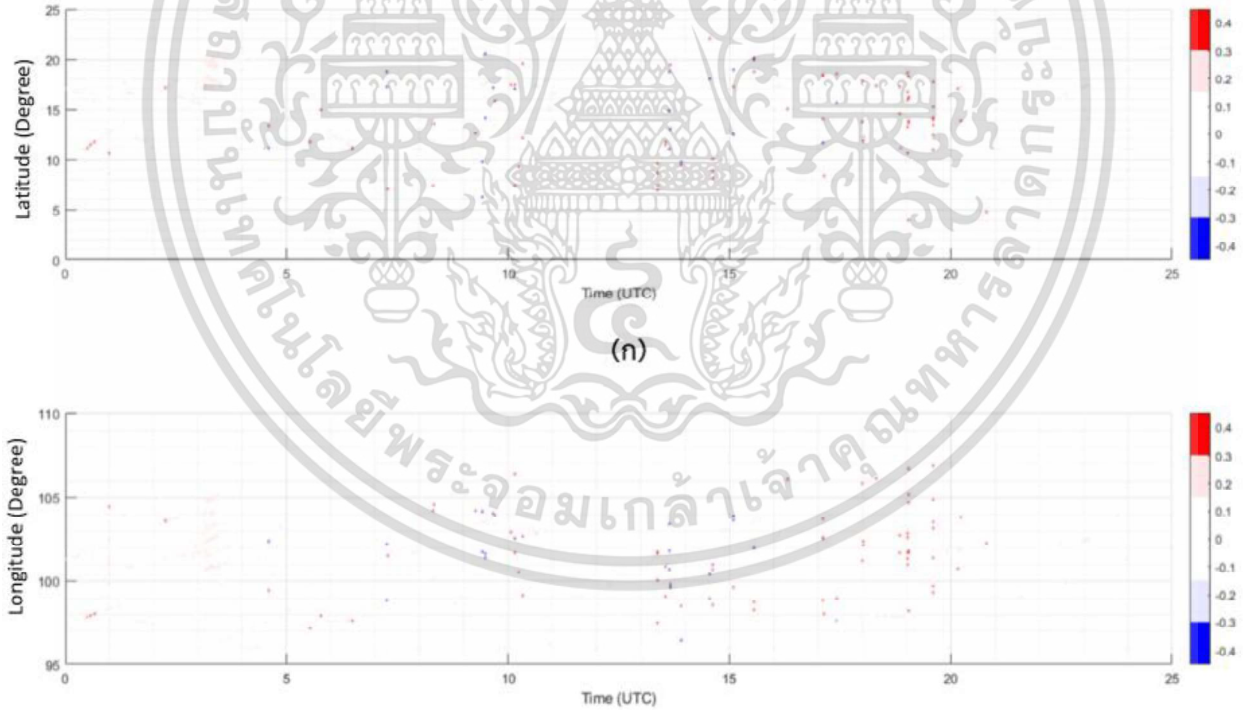
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.30 พบว่าค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิไม่เกิดความแปรปรวนขึ้น และมีค่าเกินกว่ากรอบเกณฑ์การตัดสินใจ ที่ตั้งเอาไว้เล็กน้อยตลอดทั้งวัน นำค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธินี้มาสร้างแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ได้ผลดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564 ทุก 5 นาที

จากรูปที่ 4.31 พบว่าค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิมีความสงบเงียบตลอดทั้งวัน จากผลลัพธ์นี้ทดลองมองในมุมของ Keogram ได้ดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในวันที่ 2 กุมภาพันธ์ 2564
(ก) ด้านละติจูด (ข) ด้านลองจิจูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.32 พบว่าค่าผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่แสดงใน Keogram ในวันที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์สงบนั้นจะมีเพียงแค่ค่าส่วนน้อยที่เกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจที่ได้นำเสนอ

จากเหตุการณ์ของวันที่เกิดความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ พบว่าสามารถประมาณความเร็วของเหตุการณ์ผิดปกติได้ในแนวแกนลองจิจูดได้ด้วยการหาค่าความชันของภาพ Keogram โดย 3 ใน 4 วันตัวอย่างจะมีค่าความเร็วคงที่ ยกเว้นวันที่ 17 มีนาคม 2564 เมื่อเวลาผ่านไปค่าความเร็วของเหตุการณ์ผิดปกติกลับลดน้อยลง และแผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแสดงถึงการกระจายตัวของจุดที่บริเวณศูนย์กลางเดิมซึ่งสันนิษฐานได้ว่าอาจเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหว สรุปเหตุการณ์ของทั้ง 5 วันตัวอย่างและวิเคราะห์สิ่งที่อาจเกิดขึ้นได้ดังดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการวิเคราะห์ความผิดปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์

วันที่	แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ	Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ	เหตุการณ์ที่เป็นไปได้
18 มีนาคม 2563	ค่ามีการเกาะกลุ่ม เห็นแถบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งอย่างชัดเจน 1 แถบ	เห็นแถบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งอย่างชัดเจน 3 แถบ โดยมากผิดปกติที่ละติจูดมากกว่า 8 องศา	ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมา 3 กลุ่ม
11 พฤศจิกายน 2563	เห็นความผิดปกติ 2 ระลอก ระลอกแรกค่ามีการเกาะกลุ่ม มีแถบการเคลื่อนที่ในแนวตั้งอย่างชัดเจน 1 แถบ และระลอกสองเกิดการกระจายตัวของจุดบริเวณศูนย์กลางเดิม	เห็นความผิดปกติ 2 ระลอก ระลอกแรกเป็นแถบที่ชัดเจนมาก 1 แถบ และระลอกที่สองเป็นการกระจายตัวของจุด โดยมากผิดปกติที่ละติจูดมากกว่า 8 องศา	ระลอกแรกเหมือนฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมา ระลอกสองไม่สามารถระบุได้
17 มีนาคม 2564	เกิดการกระจายตัวของจุดที่บริเวณศูนย์กลางเดิม	จุดมีการสลับขึ้นและลงเป็นช่วงอย่างชัดเจนด้วยความเร็วที่ไม่คงที่ 4 แถบ ค่าความผิดปกติเกิดที่ละติจูด 3 - 21 องศา	แผ่นดินไหว
25 มีนาคม 2564	เกิดความผิดปกติขึ้นสองแห่งในเวลาเดียวกัน แต่ไม่เห็นเป็น	จุดมีการสลับขึ้นและลงเป็นช่วงอย่างชัดเจน โดยเริ่ม	ไม่สามารถระบุได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	แถบที่ชัดเจน	จากลดลงก่อนด้วยความเร็วที่คงที่ 4 แถบ ค่าความผิดปกติเกิดที่ละติจูด 3 - 21 องศา	
2 กุมภาพันธ์ 2564	ค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงเกินกว่าเกณฑ์การตัดสินใจมากนัก	ไม่เห็นความผิดปกติ	ชั้นบรรยากาศสงบ

จากการตรวจสอบกับกองเฝ้าระวังแผ่นดินไหว (https://earthquake.tmd.go.th/) ในช่วงที่วันตัวอย่างทั้งหมดนั้นพบว่าเฉพาะในวันที่ 17 มีนาคม 2564 เกิดแผ่นดินไหวเวลา 13.17 UTC บริเวณละติจูด 15.956 องศา ลองจิจูด 96.823 องศา ซึ่งเหตุการณ์นี้อาจทำให้แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ และ Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิแสดงผลความผิดปกติที่แตกต่างไปจากวันอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.1 สรุปผลงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยสองส่วน ในส่วนแรกคือการสร้างแบบจำลองแผนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบกึ่งเรียลไทม์โดยใช้ข้อมูลจากสัญญาณ GPS โดยได้นำเสนอการใช้เทคนิคถดถอยของเคอร์เนลเกาส์เซียน ในการถ่วงน้ำหนักค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิให้กระจายได้เต็มทั่วทุกกริดบนแผนที่ และเทคนิค Thin plate spline ในการทำให้ค่าที่กริดแต่ละกริดมีการเข้าใกล้กับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจริงที่คำนวณได้ ณ พิกัด IPP โดยในส่วนผลการทดลองพบว่าค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เมื่อเทียบกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิของศูนย์การกำหนดวงโคจรในยุโรป (Center for Orbit Determination in Europe: CODE) ในหนึ่งวันมีค่า 1.2931 TECu และมีค่า Correlation เท่ากับ 0.6987 จากนั้นจึงได้ขยายผลการวิจัยในการศึกษารูปแบบข้อมูล Receiver INdependent Exchange (RINEX) เวอร์ชัน 3 เพื่อพัฒนาการใช้ข้อมูลจากระบบ GPS เป็นระบบจีเอ็นเอสเอส เพื่อที่จะได้จำนวนดาวเทียมในการวิจัยที่เพิ่มมากขึ้น และในส่วนที่สองคืออีกหนึ่งเครื่องมือในการระบุสภาวะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แบบกึ่งเรียลไทม์ วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการใช้แผนที่ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ ที่ใช้ความเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิในช่วงเวลา 30 วินาทีมาพล็อตลงบนพิกัด IPP ในแนวแกนละติจูดและลองจิจูดสองมิติร่วมกันกับการใช้ Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ให้มุมมองทางด้านเวลา และทำการกรองผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่จะต้องเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติในเวลากลางวันออกด้วยการตั้งเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อให้ Keogram ที่สร้างขึ้นแสดงเฉพาะเหตุการณ์ผิดปกติในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เท่านั้น โดย Keogram แสดงค่าเป็นแถบสีของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง และสามารถมองในมุมทางด้านแกนละติจูดหรือลองจิจูดเพื่อหาทิศทางการเคลื่อนที่ของความผิดปกติ หรือความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ความผิดปกติ โดยสมมติฐานของเหตุการณ์ฟองเส้นศูนย์สูตรพลาสมาได้ว่า ผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ผิดปกติจะเกิดออกมาจากเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กและมีทิศตั้งฉาก โดย Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิทางด้านละติจูดจะต้องเห็นความผิดปกติในละติจูดที่มากกว่า 7 องศา และต้องเกิดแถบในด้านลองจิจูด สมมติฐานของเหตุการณ์แผ่นดินไหวคือผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิจะแปรปรวนในบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหวและแพร่กระจายออกไปทุกทิศทางจากศูนย์กลางด้วยกำลังที่อ่อนลง โดย Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิทางด้านละติจูดและลองจิจูดจะต้องเห็นถึงกลุ่มของจุดกระจายตัวรอบจุดศูนย์กลาง ผลการวิจัยพบว่าสามารถแสดงคุณลักษณะของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทยในวันที่เกิดความแปรปรวนได้อย่างชัดเจน 3 ใน 4 วันตัวอย่าง โดยในการตรวจสอบกับกองเฝ้าระวังแผ่นดินไหวในวันทดลองอื่นๆ พบว่าในวันที่เกิดแผ่นดินไหวอื่นๆ ก็มีทั้งวันที่ Keogram ที่นำเสนอตรวจพบได้ และตรวจพบไม่ได้ โดยเฉพาะเหตุการณ์แผ่นดินไหวในเวลากลางวัน Keogram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะให้ภาพได้ไม่ชัดเจน แต่อย่างไรก็ตามเทคนิค Keogram ของผลต่างปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่นำเสนอก็ยังเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือสำหรับการศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณประเทศไทย

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ยังใช้ระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสได้ไม่ครบทุกระบบ เนื่องจากลักษณะของสัญญาณนำร่องในระบบ Glonass มีลักษณะต่างจากระบบอื่น และในวิทยานิพนธ์นี้ยังไม่ได้ใช้ดาวเทียมวงโคจรค้างฟ้าการคำนวณ เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ยังศึกษาเพียงการคำนวณตำแหน่งดาวเทียมที่วงโคจรระดับกลางดังที่ได้กล่าวไว้ในขอบเขตของวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Barros, H. Takahashi et al., “Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America,” Annales Geophysicae, vol. 36, pp. 91–100, 2018.

[2] T. Tsugawa , A. Saito, Y. Otsuka et al., “Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake,” Earth Planet Space, vol. 63, pp. 875-879, 2011

[3] C. Min-Yang, C. H. Lin Charles et al., “Ionospheric Disturbances Triggered by SpaceX Falcon Heavy,” Geophysical Research Letters, vol. 45, pp. 6334-6342, 2018.

[4] T. Mohamed ,K. Malek et al., “GNSSs, Signals, and Receivers,” Multifunctional Operation and Application of GPS, 2018

[5] “The Receiver Independent Exchange Format.” [Online]. Available: http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf

[6] D. Han, D. Kim , C.Kee , “Improving performance of GPS satellite DCB estimation for regional GPS networks using long-term stability,”. GPS Solution ,vol. 22, pp. 13, 2018.

[7] U. Hugentobler, M. Meindl, G. Beutler, H. Bock et al., “CODE IGS Analysis Center Technical Report 2003/2004,” IGS 2004 Technical Reports, 2006.

[8] W. Rideout and A. Coster, “Automated GPS processing for global total electron content data,” GPS Solution, vol. 10, pp. 219-228, 2006.

[9] G. Ma and T. Maruyama “Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan,” Annales Geophysicae, vol. 21,pp. 2083-2093, 2003.

[10] M. Nohutcu et al., “B-spline modeling of VTEC over Turkey using GPS observations,” Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 72, pp. 617–624, 2010.

[11] K. Watthanasangmechai et al., “TEC prediction with neural network for equatorial latitude station in Thailand,” Earth Planets and Space, vol. 64, pp. 473-483, 2012.

[12] J. Park et al., “Mitigation of ionospheric effects on GNSS positioning at low latitudes,” Journal of The Institute of Navigation, vol. 64, pp. 67-74, 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[13] S. Klinngam, “Adjusted spherical harmonic model and data aggregation for ionospheric vertical total electron content map over Thailand,” Ph.D thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand, 2018.

[14] B. Scholkopf, Kah-Kay Sung et al., “Comparing support vector machines with Gaussian kernels to radial basis function classifiers,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 11, pp. 2758-2765, 1997.

[15] A. Krypiak-Gregorczyk, P. Wielgosz, A. Borkowski, “Ionosphere Model for European Region Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation,” Remote Sensing., vol. 9, 2017.

[16] M. Hernández-Pajares, J. M. Juan et al., “The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998,” Journal of Geodesy, vol. 83, pp. 263–275, 2009.

[17] X. Pi, A. J. Mannucc et al., “Monitoring of Global Ionospheric Irregularities using the worldwide GPS network,” Geophys Res Lett, vol. 24, pp. 2283–2286, 1996.

[18] Y. Wang, Q.-H. Zhang, Y.-Z. Ma et al., “Polar Ionospheric Large-Scale Structures and Dynamics Revealed by TEC Keogram Extracted From TEC Maps,” Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้