

การศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากเครื่องรับ GPS และ BeiDou
บริเวณละติจูดต่ำเหนือจังหวัดหนองบัวลำภู ประเทศไทย
Quantification of total electron content in the ionosphere from GPS/BeiDou receiver
in low latitude region over Nongbualumphu, Thailand

ธนพล แก้วคำแจ้ง^{1*}, ธีรพงษ์ จันตะเสน², สุพรรณ ประทุมชัย³, วกร สีสัมฤทธิ์⁴, กัมปนาท บุญคง⁵,
ปริญญา โปธิหล้า⁶ และ ประวิทย์ บุรินนิต⁷

Thanapon Keokhumcheng^{1*}, Teerapong Juntasen², Suphan Phatumchai³, Wakron Seesumrit⁴,
Kampanat Boonkong⁵, Prarinya Phothila⁶ and Pravitt Burinnit⁷

^{1,2,3,4,5}เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคนิคหนองบัวลำภู จังหวัดหนองบัวลำภู 39000

⁶สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

⁷วิทยาลัยเทคนิคหนองบัวลำภู จังหวัดหนองบัวลำภู 39000

^{1,2,3,4,5}Electronics Technology Nongbualumphu Technical College, Nongbualumphu, 39000

⁶King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

⁷Nongbualumphu Technical College Nongbualumphu, 39000

Received : 2024-04-30 Revised : 2024-11-20 Accepted : 2024-11-21

บทคัดย่อ

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนรวม (Total Electron Content: TEC) ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นจากหลายปัจจัย เช่น จุดดับของดวงอาทิตย์ สunami แม่เหล็กโลก แผ่นดินไหวในแนวตั้ง และสึนามิ ซึ่งส่งผลกระทบต่อตรงต่อการสื่อสารในระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ความสูง 450 กิโลเมตร จากข้อมูลดาวเทียม GPS และ BeiDou ในพื้นที่เหนือกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบหลายความถี่ (BG2s) ติดตั้ง ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่า TEC มีความสัมพันธ์กับช่วงเวลาของดวงอาทิตย์ในแต่ละวัน ระหว่างวันที่ 14 – 31 มีนาคม 2567 โดยค่า TEC จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาที่แสงอาทิตย์เข้มข้น โดยอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ทั้งนี้ ค่า TEC จากดาวเทียม GPS และ BeiDou มีแนวโน้มสอดคล้องกัน แต่ค่า TEC จาก GPS สูงกว่า BeiDou การศึกษานี้สรุปได้ว่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาของดวงอาทิตย์ โดยจะสูงในช่วงก่อนเที่ยงวันถึงบ่ายโมง และลดลงในช่วงก่อนเที่ยงคืนจนถึงเช้าของวันถัดไป

คำสำคัญ : ไอโอโนสเฟียร์, ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก, ปริมาณอิเล็กตรอนรวม

Abstract

Variations in Total Electron Content (TEC) within the ionosphere arise from multiple factors, including solar flares, shifts in Earth's magnetic field, vertical earthquakes, and tsunamis, all of which directly impact global satellite navigation systems. This study aims to examine and compare TEC values in the ionosphere at an altitude of 450 kilometers using data from GPS and BeiDou satellites above the

*ธนพล แก้วคำแจ้ง

E-mail address : kpongthanaponok@gmail.com.

Meteorological Department in Nong Bua Lam Phu. Data was collected through a multi-frequency GNSS receiver (BG2s) installed at the Nong Bua Lam Phu Meteorological Station, serving as the foundation for analysis.

Results indicate that TEC values correlate with solar activity during the day from March 14 to March 31, 2024. TEC tends to increase during periods of intense sunlight, causing a rise in electron density within the ionosphere. Additionally, TEC values from GPS and BeiDou satellites exhibit a similar trend, though GPS consistently shows higher TEC than BeiDou. This study concludes that ionospheric TEC varies with daily solar patterns, reaching peak levels before noon and declining from midnight until the following morning.

Keywords : Ionosphere, Global Navigation Satellite System, Total Electron Content

1. บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) และการวัดปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นบรรยากาศ (TEC : Total Electron Content) มีความสำคัญอย่างยิ่งในหลายด้าน โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารและนำทางที่ใช้เทคโนโลยีดาวเทียม การวัด TEC ช่วยให้เราเข้าใจผลกระทบจากการแปรปรวนในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่มีผลต่อความแม่นยำของสัญญาณดาวเทียม รวมถึงการคำนวณความหน่วงเวลาของสัญญาณที่เดินทางจากดาวเทียมถึงเครื่องรับภาคพื้นดิน การศึกษาเหล่านี้จึงสำคัญต่อการพัฒนาระบบการสื่อสารและนำทางในระดับโลก โดยเฉพาะในระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (Global Navigation Satellite Systems : GNSS) ซึ่งสามารถคำนวณตำแหน่งและเวลาได้จากหลายระบบดาวเทียม โดยมีการศึกษาในเรื่องของระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (GNSS) คือ ระบบที่สามารถคำนวณตำแหน่ง ความเร็วและเวลาโดยรับสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางหลายระบบ [1] ในการรับส่งสัญญาณของระบบดาวเทียมนั้นจะต้องอาศัยเวลาในการรับและส่งที่แม่นยำระหว่างดาวเทียมและสถานีรับภาคพื้นดิน เนื่องด้วยการนำทาง

ด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลเป็นการวัดช่วงเวลาสัญญาณเดินทางมาจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ การประมวลผลความสามารถในการประสานเวลาหรือค่าความแตกต่างของสัญญาณเวลาที่เครื่องรับสัญญาณ [2] ทั้งนี้ยังได้มีการใช้ประโยชน์จากระบบดาวเทียมในเรื่องของการนำทางด้วยระบบดาวเทียมนำทางสากลเป็นการวัดช่วงเวลาสัญญาณเดินทางมาจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ การประมวลผลความสามารถในการประสานเวลาหรือค่าความแตกต่างของสัญญาณเวลาที่เครื่องรับสัญญาณ [3] และยังรวมถึงการพยากรณ์ทางธรณีที่นำ (GNSS) ได้ถูกนำมาใช้ในการเฝ้าติดตามแผ่นดินถล่มอย่างแพร่หลาย โดยนำเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบสัมพัทธ์และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (GNSS) [4] การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านของเวลาในระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก การบอกพิกัดและการนำทางด้วย (GNSS) อาศัยการวัดสัญญาณของคาบเวลาที่เดินทางจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับสัญญาณ (GNSS) ภาคพื้นดิน ความแม่นยำของค่าพิกัดขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเวลาบนดาวเทียมแต่ละดวงและการประสานเวลาที่ระดับต่ำกว่านาโนวินาที [5] มีผลการศึกษาพบว่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก และมีการแปรปรวนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการแปรปรวนนี้มีผลต่อสัญญาณดาวเทียม GPS [6] ปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนนั้นมีผลต่อเวลาของสัญญาณ GPS ที่ถูกใช้ในการระบุตำแหน่งในบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมาก ๆ ก็จะทำให้ผลการระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเนื่องจากเกิดความหน่วงทางเวลาของสัญญาณที่ผ่านบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอน [7] ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นย่อย ๆ ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งมีผลกระทบต่อสัญญาณที่ส่งจากดาวเทียมมายังสถานีภาคพื้นดินคือสัญญาณที่รับได้นั้นจะเกิดปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอย่างกระทันหัน และสัญญาณที่รับได้จะมีค่าหน่วงเวลา (Delay time) เนื่องจากสัญญาณดาวเทียมผ่านชั้นบรรยากาศนั้นจะเกิดการหักเหของสัญญาณ [8] การศึกษาความแปรปรวนของอิเล็กตรอนนี้สามารถทำได้โดยการตรวจวัดค่า TEC โดยปกติค่า TEC จะมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน ฤดูกาล และปี โดยขึ้นอยู่กับวัฏจักรสุริยะ ค่า TEC เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณค่าหน่วงเวลาของสัญญาณดาวเทียมอันเนื่องมาจาก

ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ความแม่นยำของระบบ GPS ต่อตำแหน่งเครื่องบินในระยะต่าง ๆ ความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ การเคลื่อนที่ของชั้นบรรยากาศโดยรวม การศึกษาการเคลื่อนไหวเปลือกโลก และการศึกษาฟองพลาสมาอันมีผลกระทบต่อสัญญาณดาวเทียม ดังนั้นการจัดทำโมเดลข้อมูลชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นที่รู้จักในการศึกษาทางด้านอวกาศเรียกว่า โมเดล International Reference Ionosphere (IRI) ในระดับนานาชาติเพื่อเก็บข้อมูลเหล่านี้ของโลก ค่า TEC เป็นตัวแปรที่สำคัญอย่างหนึ่งในโมเดลนี้ [9] โมเดล IRI เป็นโมเดลที่แสดงผลค่า TEC ที่เกิดขึ้นทั่วโลก เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูล TEC ที่เก็บได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS

จากการศึกษาและทบทวนวรรณกรรมและบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่องการศึกษาค่า TEC บนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีงานวิจัยที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยในเรื่องการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบทางด้านของเวลาในระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก การบอกพิกัดและการนำทางด้วย (GNSS) [5] การศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์พบว่า มีจำนวนปริมาณอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากและมีการแปรปรวนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการแปรปรวนนี้มีผลต่อสัญญาณดาวเทียม GPS [6] ปริมาณความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อสัญญาณ GPS ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งในบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนมาก ๆ มีผลการต่อระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเนื่องจากเกิดความหน่วงทางเวลาของสัญญาณที่ส่งผ่านบริเวณที่มีความหนาแน่นอิเล็กตรอน [7] การศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนบนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีผลกระทบต่อสัญญาณที่ส่งจากดาวเทียมมายังโลก [8] และการศึกษาความแปรปรวนของอิเล็กตรอนนี้สามารถทำได้โดยการตรวจวัดค่า TEC โดยปกติค่า TEC จะมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน ฤดูกาล และปี โดยขึ้นอยู่กับวัฏจักรสุริยะ [9]

จากการศึกษาข้อมูลในการวิจัยที่เกี่ยวข้องทางผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จากเครื่องรับ GPS และ BeiDou จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมความถี่คู่ BG2s เพื่อบันทึกค่า TEC แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่า IRI TEC เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของ TEC ว่ามีแนวโน้มและความสอดคล้องไปในทางเดียวกันมาก

น้อยเพียงใด และเก็บเป็นข้อมูลในการสมมุติฐานให้เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยผลกระทบของ TEC ที่มีผลต่อระบบการสื่อสารของ GNSS ในอนาคตต่อไป

2.วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อศึกษาค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณเหนือจังหวัดหนองบัวลำภู ประเทศไทย

2.2 เพื่อเปรียบเทียบข้อมูล TEC ที่เก็บได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาและเปรียบเทียบกับข้อมูลจากโมเดล IRI

3.วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาและวิจัยเป็นการศึกษาปริมาณอิเล็กตรอนรวม TEC ที่เก็บข้อมูลจากเครื่องรับที่สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู โดยใช้เครื่องรับ BG2s สามารถรับสัญญาณ GNSS แบบหลายความถี่เน้นการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบข้อมูล TEC จากดาวเทียมระบบ GPS และ BeiDou ในระหว่างวันที่ 14 – 31 มีนาคม 2567 กับข้อมูลที่ได้จากโมเดล IRI บริเวณเหนือจังหวัดหนองบัวลำภู เพื่อการวิเคราะห์ความแม่นยำเน้นการตรวจสอบความแม่นยำของข้อมูล TEC ที่เก็บรวบรวมจากเครื่องรับที่สถานีอุตุนิยมวิทยา โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก IRI 2020 ซึ่งเป็นโมเดลที่ใช้ทำนายสภาพอากาศในชั้นบรรยากาศทั่วโลก

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการเก็บข้อมูล TEC จากสถานีอุตุนิยมวิทยาในจังหวัดหนองบัวลำภู โดยใช้เครื่องรับ BG2s เลือกเฉพาะระบบ GPS และ BeiDou เพื่อเปรียบเทียบข้อมูล TEC กับข้อมูลจากโมเดล IRI ในช่วงเดือนมีนาคม 2567 และทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแม่นยำของข้อมูล TEC สร้างความเข้าใจในการใช้ข้อมูล TEC เพื่อปรับปรุงการใช้งานเทคโนโลยีดาวเทียมในเรื่องการหาค่าหน่วงเวลาของ GNSS ต่อไป

3.1 ลงมือติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ BG2s โดยความร่วมมือกับสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู

3.2 เก็บข้อมูล TEC จะเริ่มต้นโดยการเก็บข้อมูล Total Electron Content (TEC) จากเครื่องรับ BG2s เลือกเฉพาะระบบ GPS และ BeiDou ที่สถานีอุตุนิยมวิทยาในจังหวัดหนองบัวลำภู

3.3 ดึงข้อมูล TEC จาก IRI 2020 จากโมเดล International Reference Ionosphere (IRI) ในช่วงเดือนมีนาคม 2567

ที่เว็บไซต์ <https://irimodel.org/> เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อมูล TEC ที่เก็บได้

3.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างข้อมูล TEC ที่ได้จากระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou จากสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภูกับข้อมูลจากโมเดล IRI เพื่อทำความเข้าใจถึงความแม่นยำ

3.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูล TEC และ IRI นักวิจัยจะปรับปรุงโมเดลการทำนายสภาพอากาศในชั้นบรรยากาศเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์

3.6 ศึกษาแนวโน้มของข้อมูล TEC ที่ได้มาเตรียมใช้ในการหาค่าเวลาหน่วง (Delay Time) ที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ หรือวิธีการทำนายอื่น ๆ

3.7 สร้างความเข้าใจในการใช้ข้อมูล TEC เพื่อปรับปรุงการใช้งานเทคโนโลยีดาวเทียม

4. ผลการวิจัย

4.1 ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

ไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นบรรยากาศที่แตกตัวเป็นไอออนด้วยแสงอาทิตย์และรังสีคอสมิก อยู่บนโลกในระยะ 75-1,000 กิโลเมตร โดยมีความหนาแน่นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโลก (รัศมีของโลกคือ 6,370 กม. ดังนั้นความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์จึงค่อนข้างเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโลก) เนื่องจากพลังงานจากดวงอาทิตย์สูง อะตอมในบริเวณนี้จะแตกตัวเป็นไอออนจึงมีประจุบวก อิเล็กตรอนที่แตกตัวเป็นไอออนมีพฤติกรรมเป็นอนุภาคอิสระในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ของโลก ไอโอโนสเฟียร์ของโลกเพียงครั้งเดียวเท่านั้นที่ถูกทำให้เป็นไอออนโดยดวงอาทิตย์ได้ตลอดเวลา แต่ในช่วงกลางคืนที่ไม่มีแสงจากดวงอาทิตย์ การแตกตัวเป็นไอออนจะไม่รุนแรงเท่าตอนกลางวัน ดังนั้นไอโอโนสเฟียร์จึงมีประจุไฟฟ้าน้อยกว่ามากในเวลากลางคืน ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากมีอิทธิพลต่อการแพร่กระจายคลื่นวิทยุไปยังสถานที่ห่างไกลบนโลกและระหว่างดาวเทียมกับโลก การแบ่งชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ประกอบด้วยสามส่วนหลัก ได้แก่ ชั้น D (layer D) ชั้น E (layer E) และชั้น F (layer F) ในช่วงกลางวันในฤดูร้อน ชั้น F จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือ F1 และ F2 ชั้น D อยู่ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 75 - 90 กิโลเมตร และ

สามารถสะท้อนคลื่นวิทยุความถี่ต่ำเท่านั้น แต่จะดูดซับคลื่นความถี่สูงไว้ การปรากฏอยู่ของชั้นนี้จะขึ้นกับการส่องสว่างของดวงอาทิตย์ ดังนั้นจึงปรากฏเฉพาะตอนกลางวัน ปริมาณความหนาแน่นของปริมาณอิเล็กตรอนน้อยมากคือประมาณ 1,000 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชั้น E อยู่ที่ระดับความสูง 90 - 140 กิโลเมตร สามารถสะท้อนคลื่นความถี่ปานกลางและความถี่ที่สูงได้ แต่ปริมาณความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะแปรปรวนมาก ในช่วงกลางวันจะมีอิเล็กตรอนมากประมาณ 100,000 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ช่วงกลางคืนขนาดปริมาณอิเล็กตรอนจะลดลงเหลือ ประมาณ 200 - 10,000 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชั้น F มีความสูงที่ระดับ 140 - 2,000 กิโลเมตร ชั้นนี้เป็นชั้นที่มีอิเล็กตรอนหนาแน่นมากที่สุด ที่ระดับความสูง 300 กิโลเมตร อาจมีปริมาณอิเล็กตรอนมากถึง 100,000 ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในช่วงกลางวันของฤดูร้อน ปริมาณอิเล็กตรอนในชั้นนี้จะมีความสูง 2 ระดับ ทำให้เกิดการแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ ชั้น F1 และ F2 และจะยุบเหลือชั้นเดียวในช่วงกลางคืน เนื่องจากไอโอโนสเฟียร์ไม่สามารถสะท้อนคลื่นที่มีความถี่สูงมาก ๆ ได้ ทำให้สามารถส่งคลื่นไมโครเวฟที่ปกติมีความถี่สูงมาก ๆ เพื่อถ่ายทอดสัญญาณในการสื่อสารรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงการสื่อสารระบบดาวเทียมได้ คลื่นไมโครเวฟจะสามารถทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ขึ้นไปถึงที่ระดับความสูง 36,000 กิโลเมตร ต่อบังคับดาวเทียมมาวกกลับมายังเครื่องรับบนโลก ทำให้เราได้รับข่าวสารทางไกลราวกับได้ไปเฝ้าดูเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยตนเอง [10]

4.2 ระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก (Global Navigation Satellites : GNSS)

คือ ระบบเครือข่ายดาวเทียมนำทางที่โคจรรอบโลก ซึ่งให้บริการสำหรับระบุตำแหน่งหรือค่าพิกัดบนพื้นผิวโลก ด้วยการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณคลื่นวิทยุจากดาวเทียมที่ส่งมาอย่างต่อเนื่อง จึงสามารถใช้งานได้ครอบคลุมทั่วโลกตลอด 24 ชั่วโมง โดยมีระบบดาวเทียม GPS ที่เรารู้จักเคยเป็นส่วนหนึ่งในระบบดาวเทียม GNSS นี้ด้วยในปัจจุบันได้มีระบบดาวเทียมของประเทศอื่น ๆ ที่โคจรและให้บริการอยู่ประกอบด้วย GPS (USA), GLONASS (Russia), Galileo (Europe), BeiDou (China), Quasi-Zenith Satellite System : QZSS (Japan), Regional navigation Satellite System : IRNSS (India) ในการศึกษาวิจัยจะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่เป็นความถี่คู่หรือเครื่องรับ

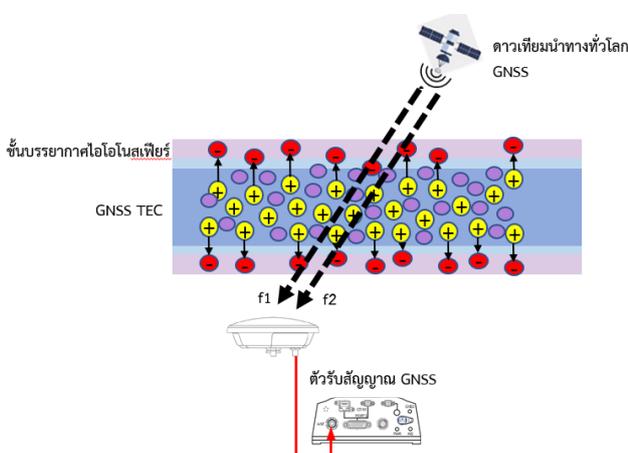
สัญญาณดาวเทียมที่เป็นความถี่แบบหลายความถี่ที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมจำนวนมากจากระบบ GNSS ได้ทั้งหมด โดยความถี่แบบหลายความถี่ที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้เป็นระบบ GPS ของสหรัฐอเมริกา และ BeiDou ของประเทศจีนสามารถแยกเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 1 สัญญาณที่ใช้ในระบบดาวเทียมนำทางทั่วโลก

ระบบดาวเทียม	สัญญาณที่ใช้
GPS	(L1) f1 คือ ความถี่ 1575.42 MHz (L2) f2 คือ ความถี่ 1227.60 MHz
BeiDou	(L1) B1 คือ ความถี่ 1561.098 MHz (L2) B2 คือ ความถี่ 1207.140 MHz

4.3 อิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์

Total Electron Content (TEC) เป็น ปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมดในเส้นทางระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมบนพื้นโลก จะได้รับผลกระทบจากจำนวนอิเล็กตรอนที่มี ซึ่งส่งผลต่อการสื่อสารระหว่างภูมิศาสตร์



รูปที่ 1 สัญญาณดาวเทียม GNSS ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งประกอบไปด้วยปริมาณอิเล็กตรอนรวม ที่มา: Kenpankho (2014, pp.13-14) [11]

TEC เป็นตัวบอกสภาพอากาศในอวกาศได้ดี โดยการวัดเป็นอิเล็กตรอนต่อตารางเมตร และหน่วยเป็น TECU = 10¹⁶ อิเล็กตรอน / m² ซึ่งมีค่าแต่ละชั้นในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ความแตกต่างของระดับ TEC นั้นจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิศาสตร์และอุตสาหกรรมการที่แตกต่างกัน โดยมีผลต่อ

การสื่อสารและการนำทางด้วยดาวเทียม การเปลี่ยนแปลงใน TEC มีผลต่อความแม่นยำของระบบนำทางด้วยดาวเทียม เช่น GPS โดยมี การใช้ แบบจำลอง Klobuchar เพื่อลดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่ง [12]

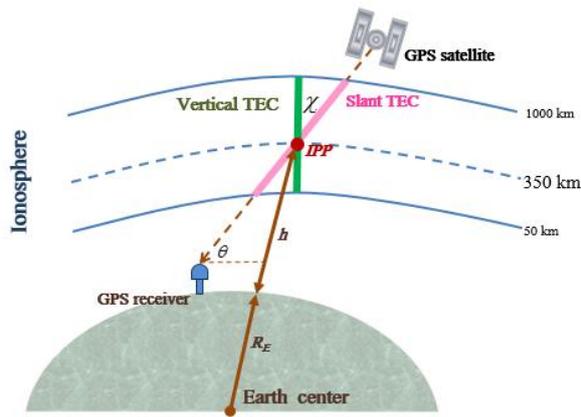
4.4 การคำนวณหาค่า TEC

4.4.1 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมอิสระในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้จากแนวเอียงของระยะทางจากจุดศูนย์กลางของโลกถึงดาวเทียม : Slant Total Electron Content (STEC) ไอโอโนสเฟียร์มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมาก อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้ส่งผลต่อสัญญาณดาวเทียม GPS และทำให้เกิดความล่าช้าในการแพร่กระจายที่แตกต่างกัน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะสูงในเวลากลางวันมากกว่าเวลากลางคืนโดยทั่วไป ปริมาณอิเล็กตรอนรวมแบบเอียง (STEC) คือจำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามเส้นทางเอียงระหว่างดาวเทียม และเครื่องรับซึ่งแสดงเป็น TECU (1 TECU = 10¹⁶ อิเล็กตรอน ต่อ ตารางเมตร) [13],[14],[15]

4.4.2 ปริมาณอิเล็กตรอนรวมอิสระในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้จากแนวตั้งฉากของระยะทางจากจุดศูนย์กลางของโลกถึงดาวเทียม Vertical Total Electron Content (VTEC) คือจำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรวมอิสระในเส้นทางแนวตั้งซึ่งแสดงใน TECU (1 TECU = 10¹⁶ อิเล็กตรอน/ตร.ม.) [13],[14],[15]

4.5 เครื่องรับสัญญาณ BG2s

ในการวัดค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวม TEC บนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้น นอกจากจะทำการคำนวณตามสมการที่ (1),(2),(3) และ (4) ที่สามารถหาได้จากข้อมูลที่มาในรูปแบบของ RINEX ไฟล์แล้วนั้น การพัฒนาเครื่องมือในการรับสัญญาณจากดาวเทียมระบบนำทางทั่วโลกได้มีการพัฒนาให้สามารถหาค่าปริมาณ TEC จากการรับสัญญาณจากดาวเทียมได้โดยตรง ซึ่งมีความสะดวกและรวดเร็วในการเก็บค่า TEC ตามวันและช่วงเวลาที่ต้องการเก็บข้อมูลได้ ในการวิจัยในครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้ใช้เครื่องรับสัญญาณ BG2s ที่ได้รับการสนับสนุนในการทำความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในนามของรัฐบาลไทย กับ Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Science ในนามของรัฐบาลจีน



รูปที่ 2 Vertical TEC (VTEC) [13]

ที่มา : http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243

สามารถคำนวณได้ดังสมการ [16]

$$VTEC = STEC \cos \chi \quad (1)$$

$$\cos \chi = \frac{VTEC}{STEC} \quad (2)$$

$$\sin \chi = \frac{R_E}{R_E + h} \cos \theta \quad (3)$$

$$\cos \chi = \sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h} \cos \theta \right)^2} \quad (4)$$

เมื่อ

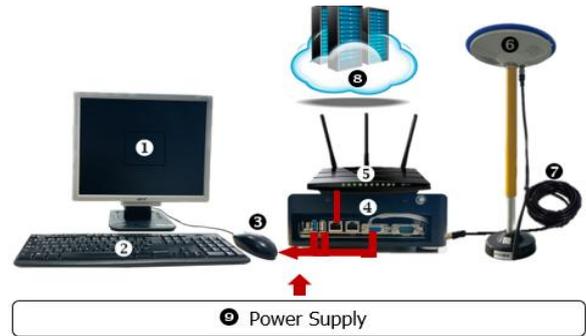
 χ คือ มุมเซนทิ (องศา) θ คือ มุมเงยของดาวเทียม (องศา) R_E คือ รัศมีของโลกเท่ากับ 6378.137 กิโลเมตร h คือ ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ประมาณ 450 กิโลเมตร

4.6 IRI TEC

The International Reference Ionosphere (IRI) เป็นโครงการระหว่างประเทศซึ่งได้รับการสนับสนุนจากคณะกรรมการวิจัยอวกาศ (COSPAR) และสหภาพวิทยาศาสตร์ในปลายยุค ค.ศ. 60 เพื่อผลิตโมเดลมาตรฐานของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่เป็นโมเดลประจำทิศทางประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่ทั้งหมด เคยมีการเผยแพร่รุ่นโมเดลที่ปรับปรุงเรื่อย ๆ ของโมเดลหลายรุ่นต่อไป

IRI TEC หมายถึง Total Electron Content ที่ถูกคำนวณด้วยโมเดล International Reference Ionosphere (IRI) ซึ่งเป็นโมเดลทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการประมาณค่าของ

ความหนาของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในช่วงหนึ่งของสถานที่และเวลาที่กำหนดไว้ โดยใช้ข้อมูลทางดาราศาสตร์และสภาพอากาศที่มีอยู่ในเวลานั้น ๆ เป็นพื้นฐานในการคำนวณและประมาณค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และมีค่า TEC ที่แตกต่างจากค่าที่วัดจริงเล็กน้อยในบางกรณี



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องรับสัญญาณ BG2s

จากรูปที่ 3 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. จอแสดงผล
2. คีย์บอร์ด
3. เม้าส์
4. ระบบปฏิบัติการ OEM628 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม
5. ระบบอินเทอร์เน็ต
6. สายอากาศ NovAtel GPS-703-GGG GNSS
7. สายเคเบิล
8. เซิร์ฟเวอร์
9. แหล่งจ่ายไฟ

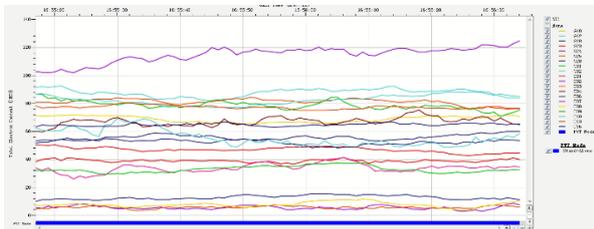
4.7 การเก็บข้อมูล TEC จากเครื่องรับ BG2s

ลงพื้นที่เพื่อทำการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ BG2s เพื่อเก็บค่า TEC จากระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou โดยเข้าพื้นที่สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู โดยมีตำแหน่งที่ตั้งของสายอากาศที่ตำแหน่ง 17.13°N , 102.25°E



รูปที่ 4 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ BG2s ที่สถานี
อุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู

ทำการตั้งค่าและทดลองเก็บค่า TEC ในช่วงเดือนมีนาคม 2567 ซึ่งมีลักษณะของหน้าจอการเก็บข้อมูล TEC ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 หน้าจอแสดงปริมาณอิเล็กตรอนรวม TEC

4.8 การเก็บข้อมูล TEC โดย IRI

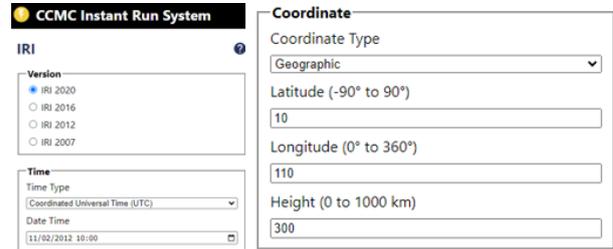
การเก็บผล TEC โดยใช้ IRI จากเว็บไซต์ซอฟต์แวร์ของ IRI ที่อยู่เว็บไซต์ <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/> ซึ่งเป็นโครงการระดับนานาชาติที่ได้รับการสนับสนุนโดย Committee on Space Research (COSPAR) และ International Union of Radio Science (URSI) ให้ใช้ฟรีผ่านเว็บไซต์ เมื่อเข้าไปที่เว็บไซต์ IRI จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา



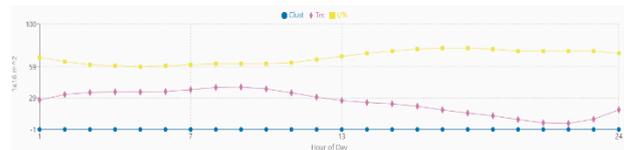
รูปที่ 6 หน้าเว็บเพจของ IRI

ผู้ใช้งานสามารถระบุพารามิเตอร์อินพุต และเลือกพารามิเตอร์เอาต์พุตที่ต้องการได้ โดยระบุพารามิเตอร์อินพุตเป็นวันเดือนปีที่ต้องการ, เวลาที่ต้องการซึ่งจะต้องทำการแปลงทศนิยมหน่วยนาที่จาก 60 นาทีเป็น 100 นาที ตำแหน่งละติจูดและลองจิจูด ความสูงของชั้นบรรยากาศ 450 กิโลเมตร และ

เลือกเอาต์พุตคือ Total Electron Content มีหน่วยเป็น $10^{16}/m^2$ [17] แสดงไว้ในรูปที่ 7 และ 8

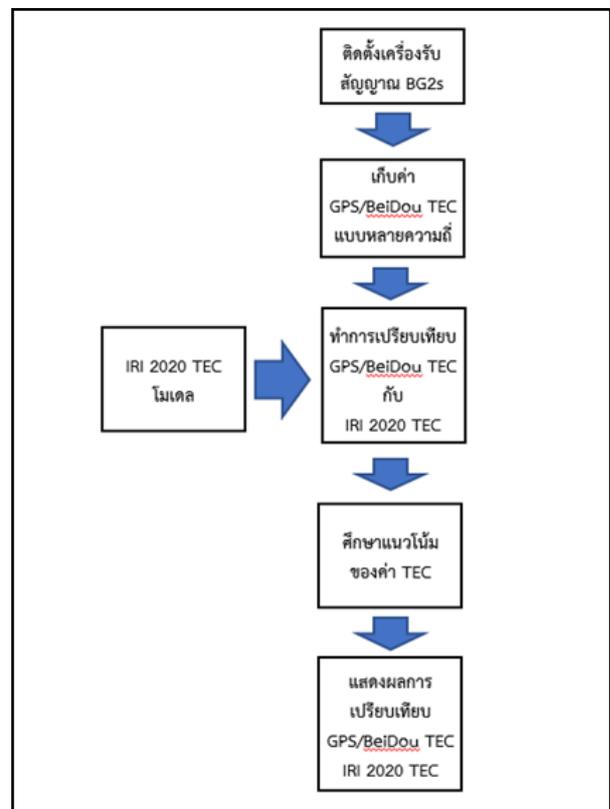


รูปที่ 7 การเลือกในการแสดงข้อมูล IRI TEC



รูปที่ 8 กราฟแสดงค่า IRI TEC

4.9 การสร้างขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 9 แสดงขั้นตอนลักษณะของการวิจัย

4.10 ผลการวิจัย

4.10.1 ทำการเก็บค่า TEC ที่ได้จากเครื่องรับ BG2s ในการเก็บบันทึกค่า TEC จะเป็นการเก็บข้อมูลในเดือน มีนาคม 2567 โดยแบ่งช่วงในการเก็บเป็นค่าเฉลี่ยของวันแบ่งออกเป็น 31 วัน นำมาเป็นข้อมูล TEC เดือนมีนาคม 2567 ระหว่าง GPS และ BeiDou สามารถแสดงผลข้อมูลได้ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่า TEC ของระบบ GPS และ BeiDou

เดือนมีนาคม 2567 ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัด
หนองบัวลำภู

Days	TECU	
	GPS	BeiDou
1	64.50711	43.3725103
2	64.86418	45.2823473
3	64.07019	43.348365
4	81.59364	49.832818
5	72.42954	52.9085861
6	73.74055	46.4790358
7	71.84848	47.042154
8	65.5243	43.9625139
9	64.02943	43.7567333
10	65.0427	43.6999119
11	65.03499	44.0322214
12	67.27603	42.554807
13	66.01582	37.1857132
14	68.0518009	47.3152186
15	67.0709284	46.9313894
16	65.2374017	48.3264571
17	66.2902281	42.7469253
18	72.2867837	48.8296174
19	77.0845674	56.2006817
20	77.8399543	53.2920237
21	79.7571883	52.0699854
22	82.6604313	60.1370511
23	90.5820855	59.986671
24	88.8256505	63.8133045
25	95.3980659	67.2990878
26	85.5773248	60.4360188
27	83.3723258	57.9170996
28	81.6666045	50.358508
29	76.073866	45.5271003
30	73.5928849	46.6287008
31	69.7309216	49.3195032

4.10.2 ทำการเก็บค่า IRI 2020 TEC

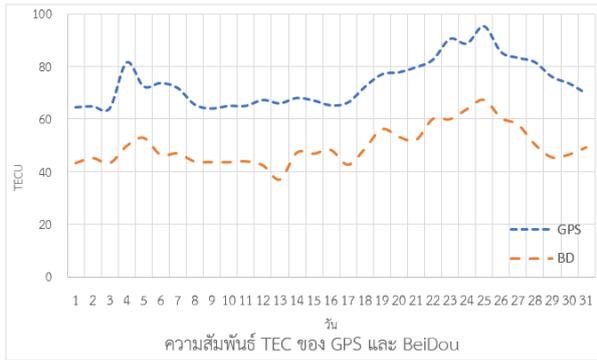
ในการเก็บบันทึกค่า IRI 2020 TEC จะเป็นการเก็บข้อมูลในเดือน มีนาคม 2567 ที่ระดับความสูงของ TEC ที่ระดับความสูง 450 กิโลเมตร จากพื้นดิน โดยแบ่งช่วงในการเก็บออกเป็น 31 วัน นำมาเฉลี่ยเป็นข้อมูล IRI 2020 TEC ของเดือนมีนาคม 2567 สามารถแสดงผลข้อมูลได้ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่า IRI 2020 TEC เดือนมีนาคม 2567 ณ สถานี

อุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู

Days	IRI 2020 TEC	Days	IRI 2020 TEC
1	49.16	17	55.94
2	49.29	18	56.09
3	49.46	19	56.25
4	51.10	20	56.44
5	49.31	21	56.62
6	49.26	22	56.79
7	49.47	23	57.01
8	49.71	24	57.33
9	54.44	25	57.69
10	54.50	26	57.68
11	54.71	27	57.65
12	54.93	28	57.88
13	55.15	29	58.02
14	55.36	30	58.21
15	55.58	31	58.38
16	55.75		

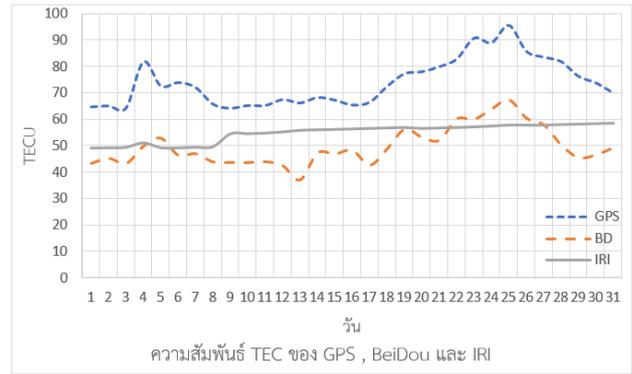
4.10.3 การเปรียบเทียบเพื่อหาแนวโน้มของค่า TEC จากการเก็บค่า TEC ที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS และ BeiDou เมื่อนำมาเปรียบเทียบหาแนวโน้มในปริมาณ TEC ว่ามีความใกล้เคียงของ TEC ไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่ สามารถแสดงผลได้ตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEC ที่บันทึกได้จากระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou ณ สถานีกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภูในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2567

จากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศที่รับได้จากเครื่องรับ BG2s ระหว่างดาวเทียมระบบนำทาง GPS และ BeiDou ในระหว่างวันที่ 1 ถึง 31 มีนาคม พ.ศ. 2567 พบว่าค่าปริมาณอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันโดยจะมีค่า GPS TEC สูงกว่าค่า BeiDou TEC มีความแตกต่างกันเฉลี่ยทั้งเดือน 24.08 TECU มีค่า GPS TEC ต่ำสุดที่ 64.02943 TECU ในวันที่ 9 มีนาคม 2567, BeiDou TEC ต่ำสุดที่ 37.1857132 TECU ในวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2567 และค่า TEC สูงสุด GPS TEC ที่ 95.3980659 TECU ในวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2567 และ BeiDou TEC มีค่า TEC สูงสุดที่ 67.2990878 TECU ในวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2567

4.10.4 การเปรียบเทียบเพื่อหาแนวโน้มของค่า TEC ที่บันทึกได้กับค่า IRI 2020 TEC หลักจากที่ทราบค่าแนวโน้มของ TEC ระหว่างดาวเทียม GPS และ BeiDou จากนั้นนำไปเปรียบเทียบค่า TEC กับ IRI 2020 TEC ว่าจะมีลักษณะเดียวกันหรือไม่ สามารถแสดงในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำ GPS TEC และ BeiDou TEC มาเปรียบเทียบกับค่า IRI 2020 TEC พบว่า ค่าที่เก็บได้จากเครื่องรับ BG2s ณ สถานีกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู ค่า TEC มีลักษณะเดียวกัน เฉลี่ย IRI 2020 TEC เดือนมีนาคม 2567 มีค่าเฉลี่ยคือ 55.447 TECU ส่วนค่าเฉลี่ย GPS TEC มีค่าเท่ากับ 73.776 TECU และ BeiDou TEC มีค่าเฉลี่ย 49.696 TECU



รูปที่ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEC ที่บันทึกได้จากระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou ณ สถานีกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู เปรียบเทียบกับค่า IRI 2020 TEC ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2567

5.อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยนี้ชี้ชัดถึงผลกระทบของกิจกรรมทางด้านอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (TEC) ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ของวัฏจักรของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีผลต่อการเกิด TEC ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของวัน ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการมีแสงอาทิตย์ที่มีความแรงมากในช่วงเวลานั้น ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนรวมในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุณหภูมิและค่า TEC ในบริเวณที่ทำการวิจัยได้เป็นอย่างดีชัดเจน โดยผลลัพธ์เหล่านี้จะมีความสำคัญในการเข้าใจและการพยากรณ์ปรากฏการณ์ทางอุตุนิยมในอนาคต โดยเฉพาะในที่นี่เน้นไปที่พื้นที่จังหวัดหนองบัวลำภู การนำผลการวิจัยเกี่ยวกับค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ไปใช้งานอาจมีประโยชน์ในหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการทำนายสภาพอากาศและปรากฏการณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ข้อมูลเกี่ยวกับค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จะช่วยในการทำนายและวิเคราะห์สภาพอากาศและปรากฏการณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างเชื่อถือได้ เช่น การทำนายความเสี่ยงของการเกิดพายุที่มีผลกระทบต่อระบบนำสัญญาณกันน้ำหนักในสื่อสารทางกายภาพ รวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีนำทาง ข้อมูลเกี่ยวกับค่า TEC สามารถนำมาใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีนำทาง และการวิเคราะห์ความเสี่ยงทางด้าน

อิเล็กทรอนิกส์การวิเคราะห์ค่า TEC สามารถช่วยในการประเมินความเสี่ยงทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่อระบบต่าง ๆ เช่น ระบบโทรคมนาคม, ระบบการทำนายอากาศและสภาพอากาศ, และระบบนำทาง ตลอดถึงการศึกษาศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมข้อมูลเกี่ยวกับค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์อาจเป็นที่จำเป็นสำหรับการศึกษาและวิจัยเพิ่มเติมในหลายด้าน เช่น การศึกษาผลกระทบของอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศต่อระบบดาวเทียม การศึกษาอิทธิพลของอิเล็กทรอนิกส์ในชั้นบรรยากาศต่ออุณหภูมิและสภาพอากาศทั่วไป

6.สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดลองค่าปริมาณอิเล็กทรอนิกส์รวม TEC บนชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ เกิดจากปรากฏการณ์ของวัฏจักรของดวงอาทิตย์ในวัฏจักรรอบที่ 25 ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีปริมาณแสงอาทิตย์ที่มีความแรงมากส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยจะเห็นว่าในช่วงระหว่างวันที่ 22 ถึง 28 มีนาคม พ.ศ. 2567 จะมีค่าปริมาณ TEC ที่สูงกว่าเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาแสงอาทิตย์มีความแรงมาก และสังเกตได้จากช่วงเวลาดังกล่าวมีอุณหภูมิ ณ บริเวณสถานีกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู โดยอุณหภูมิสูงสุดในวันที่ 25 มีนาคม พ.ศ. 2567 มีอุณหภูมิที่สูงสุดในที่ระดับ 36 – 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นผลกระทบที่มีอิทธิพลจากแสงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ผ่านเข้ามายังโลก สามารถแบ่งเวลาการเกิด TEC ได้ 4 ช่วงเวลาที่ประกอบไปด้วย ช่วงเวลาพระอาทิตย์ขึ้น ตั้งแต่ 05:00 – 07:00 น. มีค่าเฉลี่ย GPS TEC เท่ากับ 28.378 TECU, BeiDou TEC เท่ากับ 24.581 TECU. ช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่าย ตั้งแต่ 11:00 – 13:00 น. มีค่าเฉลี่ย GPS TEC เท่ากับ 127.284 TECU, BeiDou TEC เท่ากับ 78.707 TECU. ช่วงเวลาพระอาทิตย์ตกดิน ตั้งแต่ 17:00–19:00 น. มีค่าเฉลี่ย GPS TEC เท่ากับ 91.904 TECU, BeiDou TEC เท่ากับ 55.889 TECU. และช่วงเวลาเที่ยงคืน ตั้งแต่ 23:00–00:00 น. มีค่าเฉลี่ย GPS TEC เท่ากับ 49.793 TECU, BeiDou TEC เท่ากับ 27.494 TECU. และจากการทดลองวัดค่า TEC จากดาวเทียม GPS และ BeiDou ที่เก็บได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภู เปรียบเทียบกับข้อมูล IRI TEC ในช่วง

เหตุการณ์เดียวกันพบว่า ค่า TEC มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันอย่างชัดเจน โดยค่า GPS TEC จะมีระดับความสูงมากกว่าดาวเทียม BeiDou TEC ตามรูปกราฟที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEC ที่บันทึกได้จากระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou ณ สถานีกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภูในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2567 และ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า TEC ที่บันทึกได้จากระบบดาวเทียม GPS และ BeiDou ณ สถานีกรมอุตุนิยมวิทยาจังหวัดหนองบัวลำภูเปรียบเทียบกับค่า IRI 2020 TEC ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2567 ในผลการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.Pitiphum, P.Sathitchok, and P.Wasan, “Step into the world of precise positioning: Current and future developments in multiple global navigation satellite systems”, *SCIENCE AND TECHNOLOGY NAKHON SAWAN RAJABHAT UNIVERSITY JOURNAL*, Vol.9, No.10, p1-16,2018. (in Thai)
- [2] T. Thayathip, “GNSS Time and Frequency Transfer”, *ECTI Transaction on Application Research and Development*, Vol.1, No.1, p1-9,2012. (in Thai)
- [3] R. SONTAYA, “Analysis and Evaluation of GNSS Signal Quality of Plate Tectonics Measuring Stations”, *Earthquake Monitoring System Analysis and Development Sub-division Earthquake Observation Division, METEOROLOGICAL DEPARTMENT, Bangkok, THAILAND*, pp1-61, 2020. (in Thai)
- [4] P. Pornchai, D. Phutthiphon, and P. Sophon, “Evaluation of the positioning accuracy of low-cost GNSS satellite receivers for landslide monitoring”, *The 28th National Convention on Civil Engineering*, Vol.28. p1-7, 2023. (in Thai)

- [5] T. Thayathip, "GNSS time and frequency transfers", *METROLOGY info Ministry of Higher Education, Science, Research and Innovation*, Vol.23, p1-19, 2023. (in Thai)
- [6] N. Sarawut, "The ionosphere affects the accuracy of GPS positioning", *EAU Heritage Journal Science and Technology*, Vol.5, No.1, p17-25, 2011. (in Thai)
- [7] P. Wongcharoen et al., "The variation of critical frequency of E layer over Chumphon, Thailand," *2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, Melaka, Malaysia, pp. 198-201, 2013.
- [8] C. Aditep, and et al., "Study on variation of total ionospheric electron content during solar eclipse", *Kasetsart University Annual Conference*, Vol.35, p362-368, 1997. (in Thai)
- [9] K. Prasert Kenpankho, T. Busarasiri, and S. Phonchai, "Development of dual-frequency GPS receiver network system and analysis of ionospheric electron content variance over Chumphon measuring station, Thailand: Complete research report", KMITL E- Research, Documents of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Central Library Office. 2016. (in Thai)
- [10] K. Domijan, D.S. Bloomfield, and F. Pitié, "Solar Flare Forecasting from Magnetic Feature Properties Generated by the Solar Monitor Active Region Tracker", *Sol Phys*, Vol.294, No.6, p1-22,2019.
- [11] P. Kenpankho. "Comparison of GPS TEC measurements with IRI TEC prediction at the equatorial latitude station, Chumphon, Thailand", *Earth Planets Space*, Vol.63,p365-370, 2011.
- [12] U.A. Yucel, "Earthquake prediction, ionospheric total electron content, and three earthquakes in California", *Thermal Science*, Vol.23, No.1, p167-174,
- [13] Thailand GNSS and Space Weather, "Information Data Center. (n.d.). Slant Total Electron Content (STEC)", [online] http://iono-gnss.kmitl.ac.th/?page_id=243. (Accessed : October 10, 2020).
- [14] P.K.Engel, "The Global Positioning System: Signals, measurements, and performance", *Int J Wireless Inf Networks*, Vol.1, p83-105, 1994.
- [15] Y.Norsuzila, M. Abdullah, and M. Ismail, "Leveling Process of Total Electron Content (TEC) Using Malaysian Global Positioning System (GPS) Data", *American J. of Engineering and Applied Sciences*, Vol.1, No.3, p223-229, 2008.
- [16] Ma, G. and Maruyama, T. 2003. "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan." *Ann. Geophys.*, vol. 21, p2083-2093. 2003.
- [17] IRI, "International Reference Ionosphere – IRI (2016) with IGRF – 13 coefficients", [online] https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php. (Accessed : September 7, 2020).