



การวิเคราะห์อนุกรมเวลาและความเร็วของตำแหน่งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร

โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูงในประเทศไทย

ANALYSIS OF CORS POSITION TIME SERIES AND VELOCITIES

USING PRECISE POINT POSITIONING IN THAILAND

ยงยุทธ กิมาวะหา^{1*} และชัยยุทธ เจริญผล²

¹นิสิตมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-Mail: 6572073321@student.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของสถานี CORS ในประเทศไทยจากการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลา ความเร็ว และทิศทางของตำแหน่งพิกัดที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา รวมถึงศึกษาผลกระทบจากอัตราเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ต่อการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ในระยะยาว โดยทำการประมวลผลข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS ของสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร (Continuously Operating Reference Station : CORS) จากโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2562-พ.ศ. 2566 ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 5 ปี ด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูง (Precise Point Positioning : PPP) โดยอาศัยซอฟต์แวร์เชิงวิจัย GipsyX ผลการวิจัยพบว่า สถานี CORS ในประเทศไทยมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องไปในทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ที่มุมอะซิมัทเฉลี่ย $106^{\circ} 29' 42.4''$ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 29 มม./ปี โดยมีแนวโน้มอัตราเปลี่ยนแปลงที่สูงที่สุดในแนวแกน E รองลงมาคือ N และ U ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงระยะเวลาอีก 30 ปี นับจาก Epoch 2024.0 การเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS จะส่งผลกระทบต่อการปิดบรรจบเฉลี่ยของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ในบริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยเทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องของลำดับชั้นงานสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมที่หน่วยงาน FGCS กำหนด อยู่ในลำดับชั้นงาน A คิดเป็น 59.47% ของพื้นที่ ชั้นงาน AA คิดเป็น 25.95% และส่งผลกระทบอยู่ในลำดับชั้นงาน B คิดเป็น 10.40% ของพื้นที่ ผลการศึกษานี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทยมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ และทิศทางที่สอดคล้องกัน และยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา อีกทั้งยังสะท้อนถึงการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลก ในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นหากไม่นำปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มาพิจารณาในการวิเคราะห์ข้อมูลอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนได้

คำสำคัญ: การหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูง; การระบุพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GPS; อนุกรมเวลาตำแหน่งพิกัด; สถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร; การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก; โครงข่ายสามเหลี่ยม

Abstract

This research studies the movement behavior of Continuously Operating Reference Stations (CORS) in Thailand by analyzing time series data, velocity, and directional changes of station coordinates over time. Additionally, it examines the impact of CORS station displacement rates on the long-term closure accuracy of the CORS triangulation network. The study processes GPS satellite signal data from CORS stations within the RTK GNSS Network, covering the period from 2019 to 2023—five years. With precise point positioning (PPP) techniques using the GipsyX research software. The findings reveal that CORS stations in Thailand exhibit continuous southeastward movement at an average azimuth angle of $106^{\circ} 29' 42.4''$ and an average velocity of 29 mm/year, with the most pronounced change occurring along the E-axis, followed by the N and U axes, additionally. Based on the maximum deviation over the next 30 years from Epoch 2024.0, the displacement of CORS stations significantly affects the closure accuracy of the CORS triangular network across most areas in Thailand. Compared to FGCS standards for satellite survey work, the impact falls within class A for 59.47% of the area, class AA for 25.95%, and class B for 10.40%. The results demonstrate that the CORS stations in Thailand maintain consistent velocity and directional movement patterns, significantly impacting positional closure discrepancies over time. This behavior also reflects tectonic movements in the region. Failure to account for these factors during data analysis could lead to inaccurate results.

Keywords: Precise Point Positioning (PPP); GPS; Position time series; Continuously Operating Reference Stations (CORS); Tectonic plate movements; Triangulations network

1. บทนำ

แผ่นเปลือกโลกแต่ละแผ่นนั้นมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาอีกทั้งยังมีทิศทางและอัตราเร็วของการเคลื่อนตัวที่แตกต่างกัน [1] ผลจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกนั้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อการอ้างอิงค่าพิกัดซึ่งจะทำให้การระบุตำแหน่งด้วยค่าพิกัดไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง [2] อีกทั้งเมื่อมีการกระทบกระทั่งกันระหว่างขอบแผ่นเปลือกโลกอาจส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ภัยพิบัติทางธรรมชาติต่าง ๆ มากมาย เช่น แผ่นดินไหว สึนามิ ภูเขาไฟระเบิด รอยเลื่อน และแนวสันเขาใต้น้ำ ก่อนความเสียหายในวงกว้างทั้งต่อสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคม การศึกษาถึงอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกเหล่านี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติและบรรเทาผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นได้

จากความก้าวหน้าและการพัฒนาทางเทคโนโลยีการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System) ที่มีอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปัจจุบันสามารถรังวัดระบุตำแหน่งพิกัดของจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวโลกได้อย่างถูกต้องแม่นยำได้ในระยะเวลาอันรวดเร็ว [3] การสำรวจรังวัดด้วยเทคนิคนี้จึงถือเป็นองค์ความรู้พื้นฐานหนึ่งที่สำคัญและถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาค้นคว้าวิจัยสำหรับการศึกษาการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก [4] [5] [6] เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวมี

เครือข่ายสถานี GNSS ภาคพื้นดินกระจายอยู่ทุกพื้นที่ทั่วโลก มีการรับส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียมตลอดเวลา ทำให้ได้ตำแหน่งพิกัดสถานีที่มีความต่อเนื่องของชุดข้อมูล และมีความถูกต้องแม่นยำสูงเมื่อแต่ละสถานีถูกประมวลผลอย่างเป็นอิสระต่อกันด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูง ร่วมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนจาก IGS (International GNSS Service) และค่าปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอื่น ๆ ให้ค่าความถูกต้องทางราบในระดับมิลลิเมตร และทางตั้งในระดับเซนติเมตร [7] ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการติดตามการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ช้าและครอบคลุมระยะเวลานาน

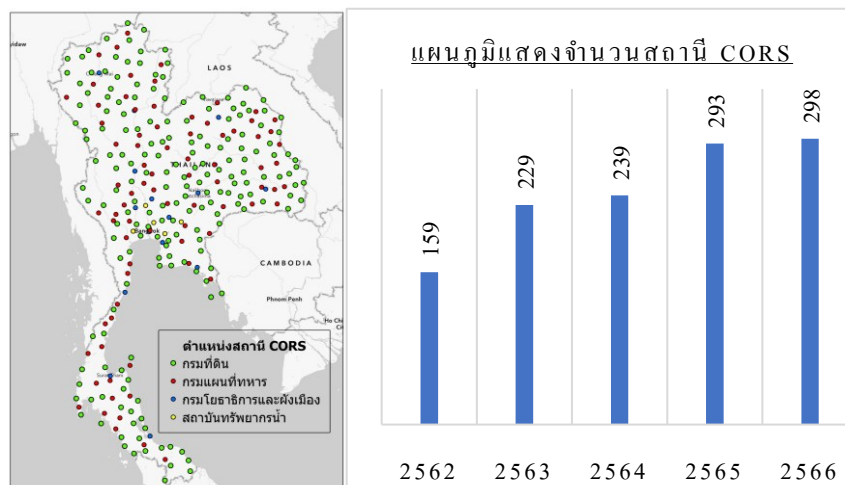
ปัจจุบันกรมที่ดินได้นำเทคโนโลยีโครงข่ายการรับส่งด้วยดาวเทียมแบบจลน์ มาใช้ยกระดับการรับส่งแปลงที่ดินเป็นวิธีแผนที่ขึ้นหนึ่งด้วยระบบดาวเทียม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2554 จนถึงปัจจุบัน มีการบูรณาการติดตั้งสถานีฐานอ้างอิงแบบรับสัญญาณต่อเนื่องถาวร ร่วมกับกรมแผนที่ทหาร จำนวน 80 สถานี กรมโยธาธิการและผังเมือง จำนวน 15 สถานี และสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) จำนวน 6 สถานี [8] ณ ปัจจุบันโครงข่ายการรับส่งด้วยระบบดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดินมีจำนวนสถานี CORS ทั้งสิ้นกว่า 298 สถานี ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศไทย เปิดใช้งานรับสัญญาณดาวเทียมตลอด 24 ชั่วโมง และให้ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร [9]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะอาศัยข้อมูลดาวเทียม GNSS จากสถานีโครงข่ายการรับส่งด้วยดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดินในช่วงปี พ.ศ. 2562-พ.ศ. 2566 มาประมวลผลด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูงโดยใช้ซอฟต์แวร์วิจัย GipsyX ทำให้ได้ข้อมูลตำแหน่งพิกัดรายวันของสถานี CORS ของทั้งโครงข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 5 ปี แล้วนำข้อมูลเหล่านี้ไปประกอบการประมวลผลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทย และศึกษาถึงผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ต่อการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS

2. ข้อมูลและวิธีการที่ใช้ในการวิจัย

2.1 ข้อมูล GNSS และพื้นที่ศึกษาวิจัย

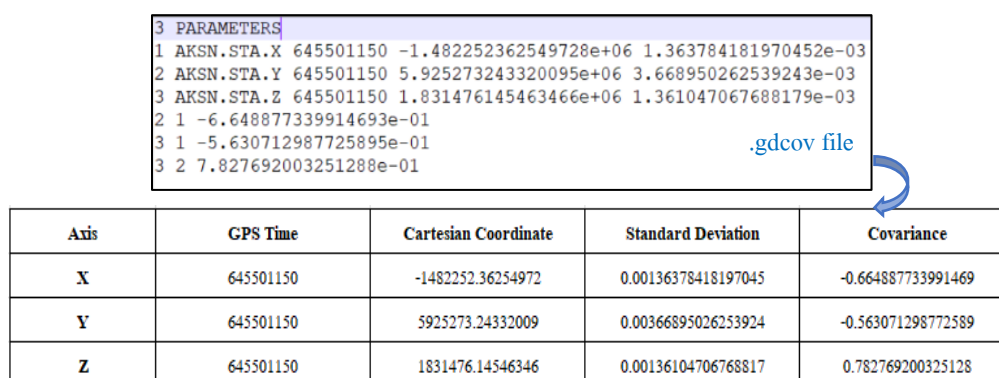
งานวิจัยนี้อาศัยข้อมูลดาวเทียม GNSS จากสถานีโครงข่ายการรับส่งด้วยดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดินที่มีการบูรณาการข้อมูลของสถานี CORS ระหว่างหลายหน่วยงานภาครัฐร่วมกัน ณ ปัจจุบันรวมแล้วกว่า 298 สถานี ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศไทย โดยข้อมูลรับส่งดาวเทียม GNSS มีการบันทึกในรูปแบบไฟล์ที่เป็นมาตรฐานสากล RINEX File อย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง 7 วันต่อสัปดาห์ ด้วยอัตราการบันทึกข้อมูลดาวเทียม (Epoch Rate) ทุก ๆ 15 วินาที ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ถูกเก็บบันทึกเป็นคาบการรับส่งแบบรายวัน ไว้ในระบบเซิร์ฟเวอร์ของกองเทคโนโลยีสารสนเทศ ที่สำหรับการศึกษาวิจัยนี้จะใช้เฉพาะข้อมูลระบบดาวเทียม GPS (Global Positioning System) ที่เป็นส่วนหนึ่งของระบบ GNSS ในการประมวลผลหาตำแหน่งพิกัดสถานี CORS แบบรายวันของทุกสถานีทั้งโครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 1 (ซ้าย) เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2562 ถึง 31 ธันวาคม 2566 เป็นระยะเวลาต่อเนื่องกันตลอดช่วงเวลา 5 ปี และเนื่องจากโครงข่ายการรับส่งด้วยดาวเทียมแบบจลน์มีการขยายโครงข่ายสถานี CORS อย่างต่อเนื่องนับแต่ปี พ.ศ. 2554 จึงทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลในแต่ละปีจะมีจำนวนสถานีที่ไม่เท่ากัน คือ 159 สถานี 229 239 293 และ 298 สถานี ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 (ขวา)



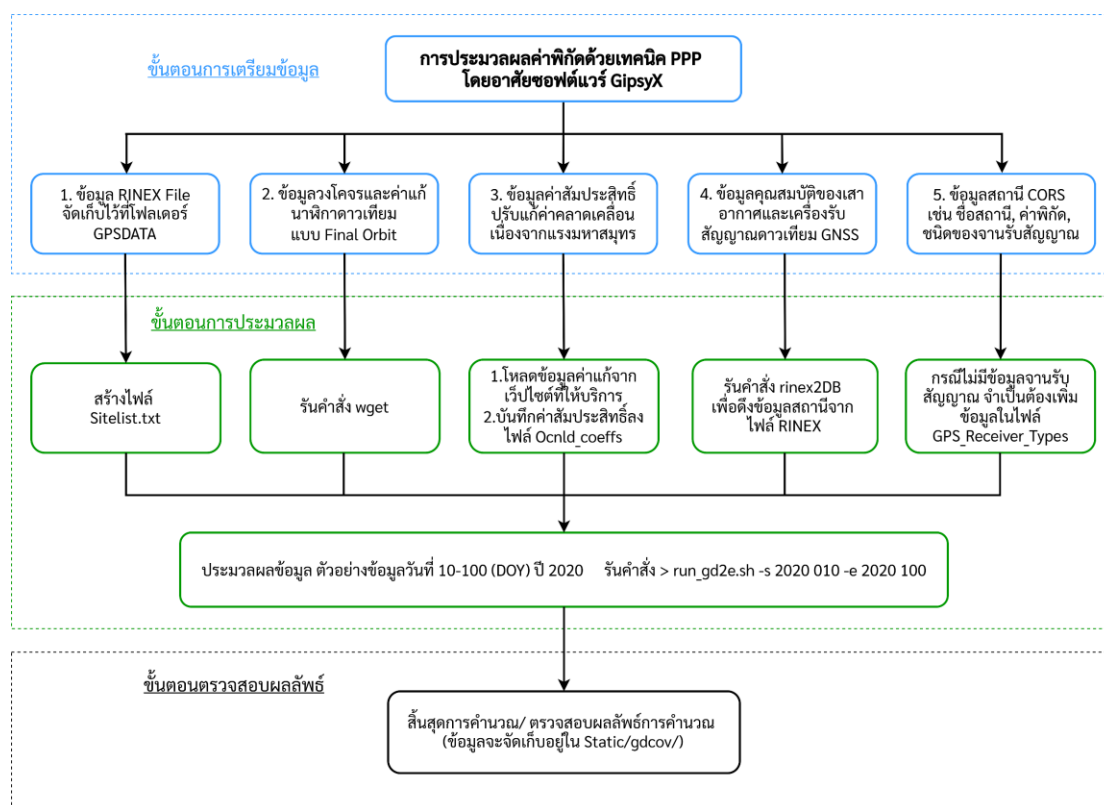
รูปที่ 1 ตำแหน่งสถานี CORS โครงการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ณ ปี พ.ศ. 2566 (ซ้าย) จำนวนสถานี CORS ในแต่ละปี (ขวา)

2.2 การประมวลผลจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูงด้วยซอฟต์แวร์เชิงวิจัย GipsyX

การประมวลผลจุดเดียวความละเอียดถูกต้องสูงเป็นเทคนิคการระบุตำแหน่งด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพียงเครื่องเดียว โดยทั่วไปแล้วจะใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS แบบสองความถี่ (Dual-Frequency) ที่มีการวัดทั้งรหัสและข้อมูลเฟสของคลื่นส่งขณะเวลาเดียวกัน ให้ค่าตำแหน่งพิกัดสามมิติที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง [7] เมื่อประมวลผลร่วมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก้ไขการหักเหของชั้นบรรยากาศ ความละเอียดสูงจาก IGS ข้อมูลค่าปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศ ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร และค่าปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอื่น ๆ โดยงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย GipsyX-2.2 ในการประมวลผลข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS เพื่อให้ได้ค่าพิกัดรายวันของสถานี CORS ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงเพียงพอต่อการนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ศึกษาวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการณ์เคลื่อนตัวของสถานี CORS ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบไฟล์ .gdcov ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีขั้นตอนของการประมวลผล ดังแสดงในรูปที่ 3



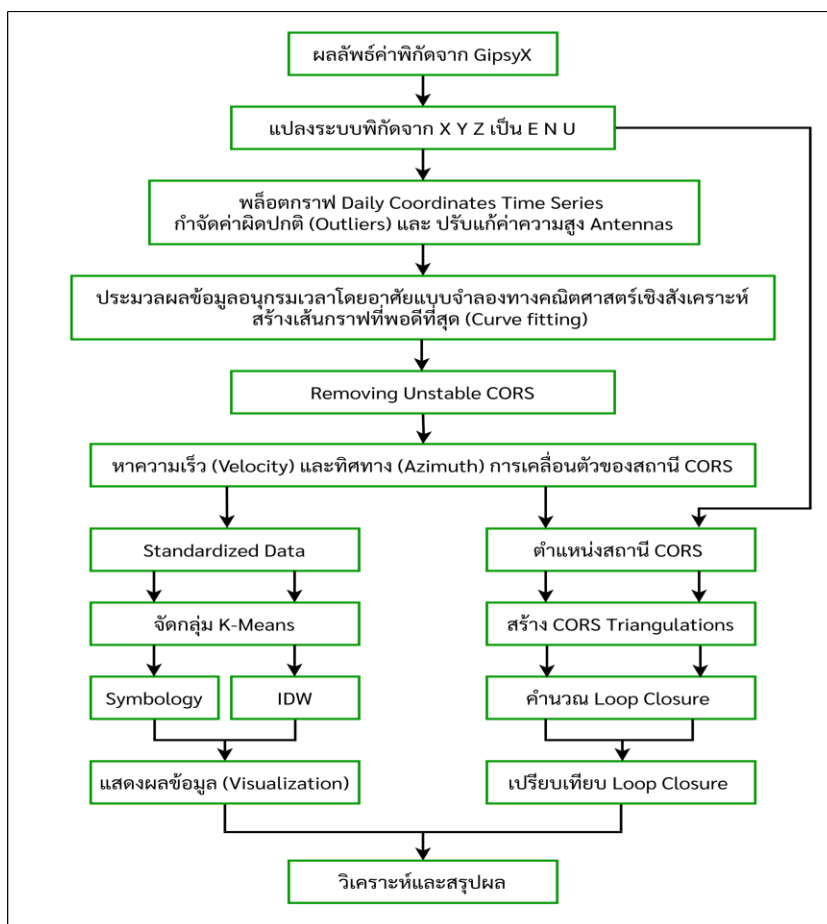
รูปที่ 2 ตัวอย่างแสดงรายละเอียดของผลลัพธ์ .gdcov file ที่ได้จากการประมวลผลสถานี AKSN ด้วยซอฟต์แวร์ GipsyX 2.2



รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการประมวลผลหาค่าตำแหน่งพิกัดสถานี CORS ด้วยซอฟต์แวร์ GipsyX 2.2

2.3 การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

การประมวลผลข้อมูลรังวัดสัญญาณดาวเทียม GPS ด้วยซอฟต์แวร์ GipsyX 2.2 ให้ผลลัพธ์เป็นรูปแบบค่าพิกัดรายวันของสถานี CORS ในระบบ ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) มีพิกัด 3 มิติ คือ X Y และ Z บนกรอบอ้างอิงพิกัดสากล ITRF2014 เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของสถานี CORS จำเป็นต้องทำการแปลงค่าพิกัดสถานี CORS ให้อยู่ในระบบพิกัด UTM มีพิกัด 3 มิติ คือ EN และ U ที่สอดคล้องกันกับค่าพิกัด ECEF ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้ไลบรารี Pyproj ในซอฟต์แวร์ Python ในการแปลงระบบค่าพิกัด แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาพล็อตกราฟแสดงอนุกรมเวลาตำแหน่งพิกัดรายวัน (Daily Coordinates Time Series) ของสถานี CORS ในแต่ละแนวแกนพิกัด EN และ U จากความสัมพันธ์ระหว่างวันที่กับตำแหน่ง พร้อมทั้งกำจัดค่าผิดปกติ (Outliers) และปรับแก้ค่าความสูง (Antennas Height Shift) จากนั้นทำการประมวลผลข้อมูลอนุกรมเวลาโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสังเคราะห์สร้างเส้นกราฟที่พอดีที่สุด (Curve Fitting) สำหรับใช้เป็นเส้นตัวแทนของข้อมูลตำแหน่งที่รังวัดได้แล้วทำการตัดสถานีที่มีลักษณะข้อมูลการเคลื่อนตัวที่ผิดปกติหรือไม่เสถียรออก (Removing Unstable CORS) ต่อจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้เหล่านี้ไปใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงขั้นตอนการศึกษาศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทย

2.3.1 การประมวลผลข้อมูลอนุกรมเวลา

การพล็อตกราฟอนุกรมเวลาดำเนินการพิกัดรายวันของสถานี CORS ในแต่ละแนวแกนพิกัด EN และ U จากความสัมพันธ์ระหว่างวันที่กับตำแหน่ง เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเคลื่อนตัวของพื้นผิวโลกอันเกิดจากกิจกรรมทางธรณีวิทยา [5] [6] จำเป็นจะต้องประมวลผลข้อมูลด้วยวิธีการทางสถิติ แล้วหาเส้นโค้งทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดมาซ้อนทับกับข้อมูลจริงสำหรับใช้เป็นเส้นตัวแทนของข้อมูลตำแหน่งที่รังวัดได้ เพื่อให้กราฟนั้นมีความสัมพันธ์กับชุดข้อมูลและมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของตำแหน่งพิกัดสถานี CORS ในอนาคต จึงได้มีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสังเคราะห์ (Synthetic Mathematical Model) โดยอาศัยฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ร่วมกับฟังก์ชันคาบ (Periodic Function) สร้างเส้นกราฟที่พอดีที่สุด ดังสมการที่ 1

$$y(t_i) = a + b(t_i) + c \cdot \sin(2\pi(t_i + d)) + e \cdot \sin(4\pi(t_i + f)) + g \cdot \sin(6\pi(t_i + h)) \quad (1)$$

โดยที่ t_i คือ เวลาของอนุกรมตำแหน่งในหน่วยปีทศนิยม a คือ ตำแหน่งพิกัดเริ่มต้น ณ เวลาอ้างอิง b คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ c, d, e, f and g, h คือ องค์ประกอบฮาร์มอนิกของการเคลื่อนที่รายปี รายครึ่งปี และรายสี่เดือน

2.3.2 การคำนวณการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS

การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของสถานี CORS มักนิยมใช้ข้อมูลที่มีการเก็บบันทึกรวบรวมข้อมูลจากสถานีนั่น ๆ เป็นระยะเวลาต่อเนื่องและยาวนาน เช่น หลายเดือนหรือหลายปี โดยนำข้อมูลรังวัดที่มีการเก็บบันทึกพร้อมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก้ไขดาวเทียมความละเอียดสูงจาก IGS และค่าปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนอื่น ๆ มาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์เชิงวิจัย ซึ่งซอฟต์แวร์เหล่านี้ให้ผลลัพธ์ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง [7] แล้วจึงวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงพิกัดตำแหน่งของสถานีในแต่ละแนวแกนพิกัดเทียบกับแต่ละช่วงเวลา เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงทั้งในเรื่องของความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนตัว ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเร็วของการเคลื่อนตัวของสถานี CORS มักจะอยู่ในหน่วยมิลลิเมตรต่อปี (mm/year) คำนวณได้จากสมการที่ 2 และ 3

$$v_{2D} = \sqrt{v_E^2 + v_N^2} \quad (2)$$

$$azimuth = \tan^{-1}\left(\frac{v_E}{v_N}\right) \quad (3)$$

โดยที่ v_{2D} คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ทางแนวราบ v_E คือ ความเร็วของการเคลื่อนตัวทางแกน E v_N คือ ความเร็วของการเคลื่อนตัวทางแกน N $azimuth$ คือ ทิศทางของการเคลื่อนตัวโดยวัดจากทิศเหนือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

2.3.3 การวิเคราะห์การปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS

ข้อกำหนดของงานสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมโดยทั่วไปแล้วจะนิยามกำหนดให้มีการตรวจสอบความถูกต้องของระยะเส้นฐาน (Baseline) ระหว่างระยะเส้นฐานที่รังวัดได้ (Observation Baseline) กับระยะเส้นฐานคงที่ (Fixed Baseline) เช่น ระยะเส้นฐานของสถานีควบคุม (Fixed Control Station) สำหรับการขยายโครงข่ายหมุดควบคุมในงานสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมมักจะประกอบไปด้วยเส้นฐานหลาย ๆ เส้นต่อเชื่อมกันเป็นรูปปิด (Close Loop) และแต่ละรูปเชื่อมต่อกันหลาย ๆ รูปเกิดเป็นโครงข่าย โดยที่ผลรวมเชิงพีชคณิต ΔE ΔN และ ΔU ของส่วนประกอบรูปปิดควรมีค่าเท่ากับศูนย์ หากมีค่าความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบ (Misclosure of Loops) ภายในรูปใด ๆ จะบ่งชี้ถึงข้อผิดพลาดที่อาจมีอยู่ในเส้นฐานนั้น ๆ ที่ประกอบเป็นรูปปิด สิ่งสำคัญคือต้องไม่รวมเส้นฐานที่มีข้อผิดพลาดนั้นเข้าไปในการคำนวณปรับแก้โครงข่าย (Network Adjustment) เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของหมุดควบคุมอื่น ๆ ในโครงข่ายไปด้วย ตัวอย่างการคำนวณการปิดบรรจบของรูปสามเหลี่ยม ABC สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ 4 5 และ 6

$$lc = \sqrt{c_E^2 + c_N^2 + c_U^2} \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } lc \text{ คือ ระยะที่ผิดพลาดของการเข้าบรรจบกันของรูปสามเหลี่ยม ABC และ } c_E = \Delta E_{AB} + \Delta E_{BC} + \Delta E_{CA}$$

$$c_N = \Delta N_{AB} + \Delta N_{BC} + \Delta N_{CA} \quad c_U = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CA}$$

$$S_{ABC} = S_{AB} + S_{BC} + S_{CA} \quad (5)$$

$$\text{โดยที่ } S_{ABC} \text{ คือ ระยะทั้งหมดของรูปสามเหลี่ยม ABC และ } S_{AB} = \sqrt{\Delta E_{AB}^2 + \Delta N_{AB}^2 + \Delta U_{AB}^2}$$

$$S_{BC} = \sqrt{\Delta E_{BC}^2 + \Delta N_{BC}^2 + \Delta U_{BC}^2} \quad S_{CA} = \sqrt{\Delta E_{CA}^2 + \Delta N_{CA}^2 + \Delta U_{CA}^2}$$

$$\text{Parts Per Million (ppm)} = \left(\frac{L_c}{S_{ABC}} \right) \times 1,000,000 \quad (6)$$

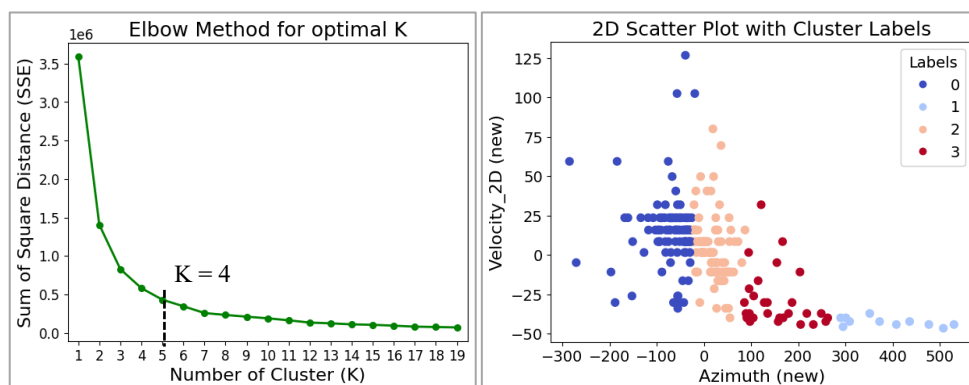
อัตราส่วน ppm ดังกล่าวนี้สามารถเปรียบเทียบกับค่าที่กำหนดในแนวทาง FGCS (The Federal Geodetic Control Subcommittee) ซึ่งระบุลำดับ (Order) ของชั้นงานความถูกต้องไว้ 7 ลำดับ คือ ชั้นงาน AA A B C-I C-2-I C-2-II และ C-3 ดังแสดงในตารางที่ 1 เพื่อพิจารณาว่าเป็นที่ยอมรับสำหรับลำดับหรือผ่านเกณฑ์ความถูกต้องของงานสำรวจจริงหรือไม่ นอกจากนี้แนวทาง FGCS ยังระบุเกณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องปฏิบัติตามในการวิเคราะห์การเข้าบรรจบกันของรูปปิดนอกเหนือจากค่า ppm อีกด้วย [10]

ตารางที่ 1 แสดงลำดับความถูกต้องของชั้นงาน โดย FGCS

GPS Relative Positioning Orders of Accuracy		
Order	Allowable Error Ratio	Parts Per Million (ppm)
AA	1: 100,000,000	0.01
A	1: 10,000,000	0.1
B	1: 1,000,000	1.0
C-1	1: 100,000	10
C-2-I	1: 50,000	20
C-2-II	1: 20,000	50
C-3	1: 10,000	100

2.3.4 K-Means Clustering

K-Means Clustering เป็นเทคนิคการแบ่งกลุ่มที่มีเป้าหมายเพื่อแบ่งข้อมูลออกเป็นกลุ่มที่มีความคล้ายคลึงกันภายในกลุ่มและมีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่ม ซึ่งงานวิจัยนี้มีการแบ่งกลุ่มการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS โดยอาศัยพารามิเตอร์ 2 ตัว คือความเร็วและทิศทาง ซึ่งทั้งสองค่ามีหน่วยการวัดที่แตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องทำให้ค่าทั้งสองมีช่วงค่าหรือหน่วยที่ใกล้เคียงกันก่อน ด้วยวิธีการปรับสเกลข้อมูล (Standardized Data) จะได้เป็นค่า z-score ที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูล แล้วจึงนำค่านี้กลับเข้าไปคูณเข้ากับชุดข้อมูลเดิม ต่อจากนั้นใช้ Elbow Method เพื่อคำนวณหาค่า K (จำนวนกลุ่ม) ที่เหมาะสม โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนกลุ่มกับค่า Sum of Squared Distances (SSE) ค่า K ที่เหมาะสมคือจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงความชันอย่างชัดเจนจากชันลงมาเป็นค่อนข้างราบ (เลือก K = 4) ดังแสดงในรูปที่ 8 (ซ้าย) จากนั้นจึงประมวลผลด้วยอัลกอริทึม K-Means และจำแนกผลลัพธ์ออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อทำนายกลุ่มของแต่ละสถานี พร้อมทั้งแสดงผลการจัดกลุ่มในรูปแบบ Scatter Plot โดยสีของจุดแสดงถึงกลุ่มที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 8 (ขวา)



รูปที่ 8 จุด Elbow ที่ใช้ในการเลือกค่า K (ซ้าย) กราฟ Scatter Plot แสดงผลการจัดกลุ่มด้วยเทคนิค K-Means (ขวา)

3. ผลการศึกษาวิจัยและอภิปรายผล

ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการประมวลผลด้วยข้อมูลและด้วยวิธีการที่ใช้ในการวิจัย สามารถแบ่งผลการศึกษาวิจัยออกเป็นสองส่วน ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ การศึกษาถึงพฤติกรรมการณ์การเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทย และการศึกษาถึงผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ต่อการปิดรับของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS

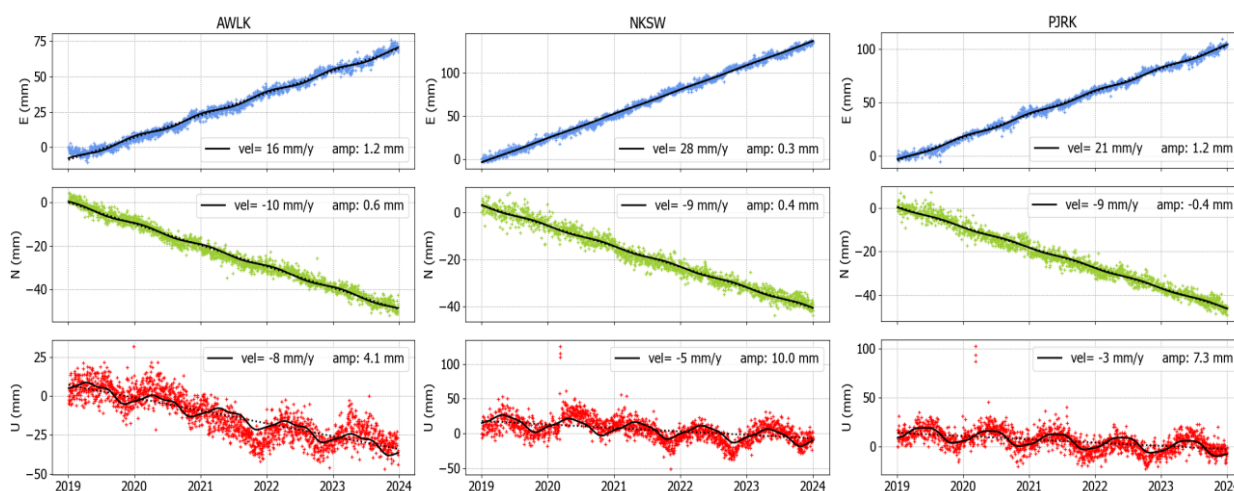
3.1 การศึกษาถึงพฤติกรรมการณ์การเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทย

จากการประมวลผลข้อมูลดาวเทียมที่รังวัดด้วยระบบดาวเทียม GPS ของโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ในช่วงปี พ.ศ. 2562-พ.ศ. 2566 ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 5 ปี ในแต่ละปีมีจำนวนสถานีที่ไม่เท่ากันคือ 159 229 239 293 และ 298 สถานี ตามลำดับ ด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดถูกต้องสูงโดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย GipsyX 2.2 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าพิกัดรายวัน ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง ต่อจากนั้นจึงทำการพล็อตกราฟอนุกรมเวลาของสถานี CORS แยกกันในแต่ละแนวแกนพิกัด E N และ U จากความสัมพันธ์ระหว่างวันที่กับตำแหน่ง และได้มีการกำจัดตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและแม่นยำในการใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เช่น การกำจัดข้อมูลที่ผิดปกติ การปรับค่าความสูงของงานรับสัญญาณดาวเทียม และการตัดสถานี CORS ที่ไม่เสถียรออกไป จนเหลือจำนวนสถานีที่เหมาะสมทั้งสิ้น 261 สถานี ซึ่งผลจากการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาและความเร็วของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทยเป็นดังนี้

3.1.1 อนุกรมเวลาตำแหน่งพิกัดของสถานี CORS

การศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลาตำแหน่งพิกัดของสถานี CORS ทำให้ทราบถึงแนวโน้มอัตราการเปลี่ยนแปลงที่มีในแต่ละแนวแกนพิกัด ความผันผวนของข้อมูล และรูปแบบการเคลื่อนตัวที่เป็นวัฏจักรรายปี (Annual Motion) ของสถานี CORS ในแต่ละพื้นที่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งผลการวิจัยพบว่า แนวแกน E ตำแหน่งพิกัดของทุกสถานีมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น (ค่าเป็นบวกและไปทางทิศตะวันออก) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 28 มม./ปี โดยสถานี DSSK มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงที่สุด 41 มม./ปี และสถานี KPNG มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่ต่ำสุด 12 มม./ปี และแนวแกน E มีคาบของการเปลี่ยนแปลง (Amplitude) เฉลี่ย 1.41 มม. โดยสถานี TNPM มีคาบของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด 7.79 มม. และสถานี JAHM มีคาบของการเปลี่ยนแปลงต่ำสุด -0.08 มม. แนวแกน N ตำแหน่งพิกัดของสถานีส่วนใหญ่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง (ค่าเป็นลบและไป

ทางทิศใต้) ยกเว้นสถานี MKRI และสถานี KHYI (ค่าเป็นบวกและไปทางทิศเหนือ) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย -8 มม./ปี โดยสถานี TNSN มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด 13 มม./ปี และสถานี KHYI มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำสุด 1 มม./ปี มีค่าของการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย 0.36 มม. โดยสถานี DLEI มีค่าของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด -6.67 มม. และสถานี LPBI มีค่าของการเปลี่ยนแปลงต่ำสุด 0.07 มม. และแนวแกน U ตำแหน่งพิกัดของสถานีส่วนใหญ่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ลดลง (ค่าเป็นลบและทรุดตัวลง) ยกเว้นบางสถานีเท่านั้น (ค่าเป็นบวกและขยับตัวขึ้น) มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย -4 มม./ปี โดยสถานี AYYA มีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุด -13 มม./ปี และสถานี KLLN มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำสุด 0.1 มม./ปี มีค่าของการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย -2.88 มม. โดยสถานี TKK1 มีค่าของการเปลี่ยนแปลงสูงสุด 11.13 มม. และสถานี JAHM มีค่าของการเปลี่ยนแปลงต่ำสุด -0.61 มม.

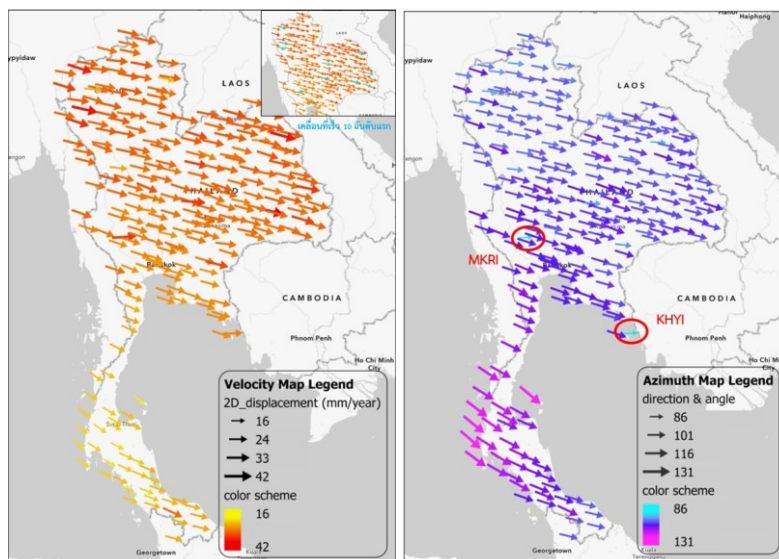


รูปที่ 9 กราฟอนุกรมเวลาตำแหน่งพิกัดของสถานี AWLK (ซ้าย) สถานี NKSW (กลาง) และสถานี PJRK (ขวา)

3.1.2 ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของตำแหน่งสถานี CORS

จากการศึกษาข้อมูลความเร็วของการเคลื่อนที่ทางแกนราบ (v_{2D}) ทำให้ทราบถึงภาพรวมของความเร็วในการเคลื่อนที่ของสถานี CORS ในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย ว่ามีสถานีใดบ้างที่เคลื่อนที่เร็ว ปานกลาง หรือช้า มากน้อยเพียงใด และในแต่ละบริเวณนั้นเคลื่อนที่สอดคล้องเกี่ยวเนื่องกันหรือไม่อย่างไร ผลการวิจัยพบว่า สถานี CORS บริเวณภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันตกมีความเร็วในการเคลื่อนที่ตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยสถานีที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูง (10 อันดับแรก) กระจายตัวอยู่ตามภาคต่าง ๆ เหล่านี้ ส่วนบริเวณภาคใต้มีมีการเคลื่อนที่ตัวที่ค่อนข้างช้าเมื่อเทียบกับภาคอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 10 (ซ้าย) และสถานี CORS ในประเทศไทยมีความเร็วในการเคลื่อนที่ทางแกนราบเฉลี่ย 29 มม./ปี โดยสถานี DSSK มีความเร็วในการเคลื่อนที่ทางแกนราบสูงสุด 42 มม./ปี และสถานี KPNG มีความเร็วในการเคลื่อนที่ทางแกนราบต่ำสุด 16 มม./ปี และจากการศึกษาข้อมูลทิศทางการเคลื่อนที่ (Azimuth) ของตำแหน่งสถานี CORS ทำให้เห็นถึงภาพรวมของทิศทางการเคลื่อนที่ของสถานี CORS ในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย ซึ่งจะเห็นว่าสถานี CORS ในประเทศไทยส่วนใหญ่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ เฉลี่ยที่มุมอะซิมัท $106^{\circ} 29' 42.4''$ ยกเว้นสถานี MKRI เคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออก ที่มุมอะซิมัท $81^{\circ} 9' 29.17''$ และสถานี KHYI เคลื่อนที่ไปทางทิศตะวันออก ที่มุมอะซิมัท $87^{\circ} 29' 16.51''$ ดังแสดงในรูปที่ 10 (ขวา)

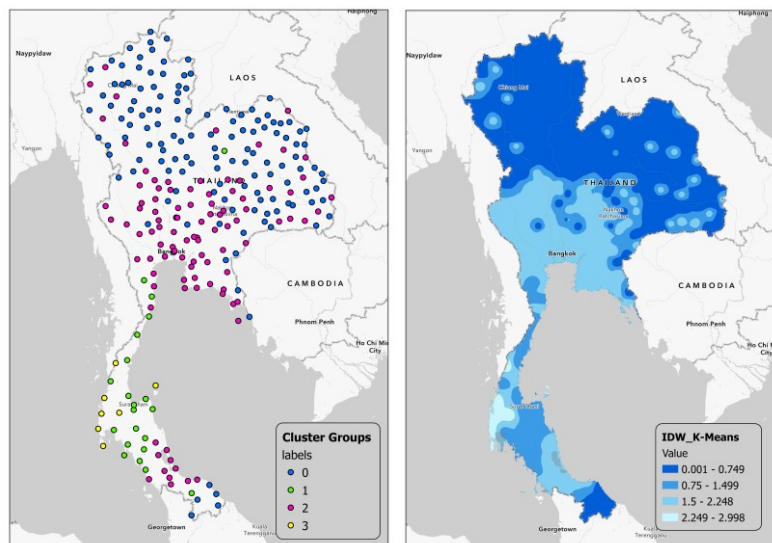
จากผลการศึกษาวิจัยในข้อ 3.1.1 และ 3.1.2 การที่สถานี CORS ซึ่งมีที่ตั้งชิดติดกับพื้นผิวโลกเกิดการเคลื่อนที่ แสดงให้เห็นว่าแผ่นเปลือกโลกที่สถานีตั้งอยู่ก็เคลื่อนที่ไปด้วยเช่นกัน ทิศทางและอัตราเร็วของการเคลื่อนที่ของสถานี CORS จึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณนั้นด้วย



รูปที่ 10 แผนที่แสดงความเร็วของการเคลื่อนที่ทางแกนราบ (ซ้าย) และทิศทางการเคลื่อนที่ (ขวา) ของตำแหน่งสถานี CORS

3.1.3 การจัดกลุ่มด้วยเทคนิค K-Means Clustering

จากการศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทยด้วยเทคนิคการจัดกลุ่ม K-Means Clustering เพื่อจำแนกกลุ่มของข้อมูลตามรูปแบบการเคลื่อนตัวของสถานีที่คล้ายคลึงหรือสอดคล้องกันในแต่ละกลุ่ม และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีในแต่ละกลุ่มว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันระหว่างกลุ่มอย่างไร ช่วยให้เราสามารถระบุสถานี CORS ที่มีความผิดปกติในการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจเป็นสัญญาณเตือนภัยล่วงหน้าของเหตุการณ์ทางธรณีวิทยาที่สำคัญ โดยการจำแนกกลุ่มจะอาศัยความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ 2 ตัว ได้แก่ ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนตัว พร้อมทั้งแสดงผลข้อมูลในรูปแบบแผนที่ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อจำแนกแต่ละกลุ่มด้วยสัญลักษณ์ (Symbology) ที่แตกต่างกัน กลุ่มที่ 1 (labels 0) และกลุ่มที่ 3 (labels 2) ซึ่งทั้งสองกลุ่มถือเป็นข้อมูลส่วนใหญ่ (คิดเป็น 90%) มีการกระจายตัวของตำแหน่งที่ไม่เป็นรูปแบบ สลับกันไปมาทั่วทั้งบริเวณพื้นที่ของประเทศไทย ส่วนกลุ่มที่ 2 (labels 1) และกลุ่มที่ 4 (labels 3) ถือเป็นกลุ่มข้อมูลส่วนน้อย (คิดเป็น 10%) แต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวของตำแหน่งในลักษณะที่ใกล้เคียงกัน กระจุกวัดอยู่ทางโซนภาคใต้ ดังแสดงในรูปที่ 11 (ซ้าย) และเมื่อทำการประมาณค่าในช่วงเพื่อสร้างพื้นผิวด้วยวิธีการ IDW (Inverse Distance Weighting) พบว่า ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือพื้นที่ส่วนใหญ่ถูกจำแนกให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เช่นเดียวกันกับกลุ่มของภาคตะวันตก ภาคกลาง และภาคตะวันออก ส่วนบริเวณภาคใต้พื้นที่โดยรวมถูกจำแนกออกเป็นหลายกลุ่มด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 11 (ขวา)



รูปที่ 11 แผนที่จากการจำแนกกลุ่มด้วยสัญลักษณ์สี (ซ้าย) แผนที่จากการประมาณค่าในช่วงด้วยวิธีการ IDW (ขวา)

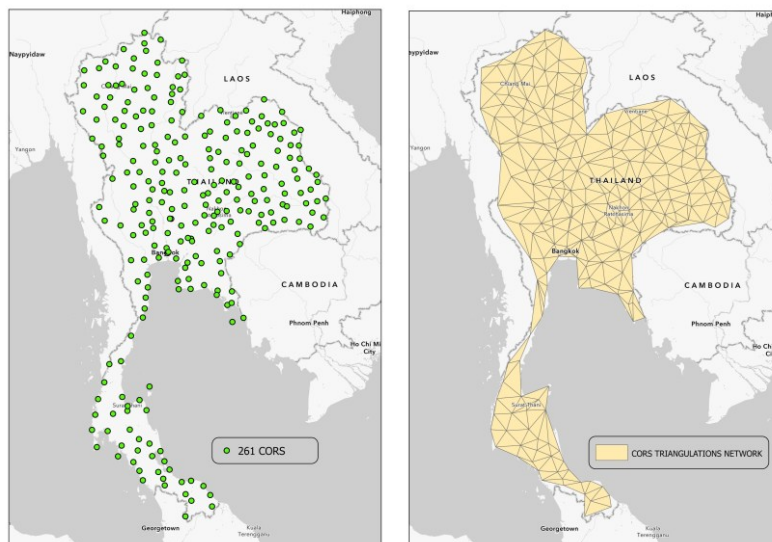
3.2 การศึกษาถึงผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทยต่อการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS

จากการประมวลผลข้อมูลอนุกรมเวลาโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงสังเคราะห์สร้างเส้นที่พอดีที่สุดทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) ของอนุกรมเวลาตำแหน่งพิกัดของสถานี CORS หรืออาจเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการเคลื่อนตัวในแต่ละแนวแกนพิกัด E N และ U สำหรับใช้คำนวณหาตำแหน่งพิกัดสถานี CORS ในอนาคต ดังแสดงในสมการที่ (1) โดยการคำนวณจะพิจารณาอยู่บนสมมติฐาน 2 ข้อ คือ 1. ในระหว่างช่วงเวลานี้ไม่มีเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่หรือการเคลื่อนตัวของสถานี CORS ที่ผิดปกติ 2. การไม่ปรับเปลี่ยนค่าพิกัดสถานี CORS ที่มีการเคลื่อนตัวตามห้วงเวลาที่เปลี่ยนไปจะส่งผลกระทบต่อโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS อย่างไร และเนื่องจากการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกนั้นมียุทธการเปลี่ยนแปลงที่ช้าและครอบคลุมระยะเวลานาน เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้น งานวิจัยนี้จึงได้มีการแบ่งช่วงการศึกษาถึงผลกระทบออกเป็น 6 ช่วง ได้แก่ ผลกระทบในช่วงระยะเวลา 5 ปี 10 ปี 15 ปี 20 ปี 25 ปี และ 30 ปีในอนาคต ซึ่งผลจากการศึกษาถึงผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทยต่อการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS เป็นดังนี้

3.2.1 โครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS (CORS Triangulations Network)

เมื่อนำสถานี CORS ทั้ง 261 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 12 (ซ้าย) ที่ได้จากผลลัพธ์ในหัวข้อ 3.1 มาทำการประมวลผลเพื่อสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS จากชุดข้อมูลตำแหน่งพิกัดโดยใช้ฟังก์ชัน Delaunay จากไลบรารี scipy ที่มีในซอฟต์แวร์ Python สำหรับใช้เป็นแผนที่หลัก (Base Map) ในการแสดงผลค่าความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งเมื่อตัดสามเหลี่ยมรูปปิด (Triangle Loops) ที่อยู่นอกบริเวณขอบเขตประเทศไทยและเลือกเฉพาะรูปที่ต้องการพิจารณาทำให้ได้ผลลัพธ์ของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ดังแสดงในรูปที่ 12 (ขวา) ประกอบด้วยสามเหลี่ยมรูปปิด

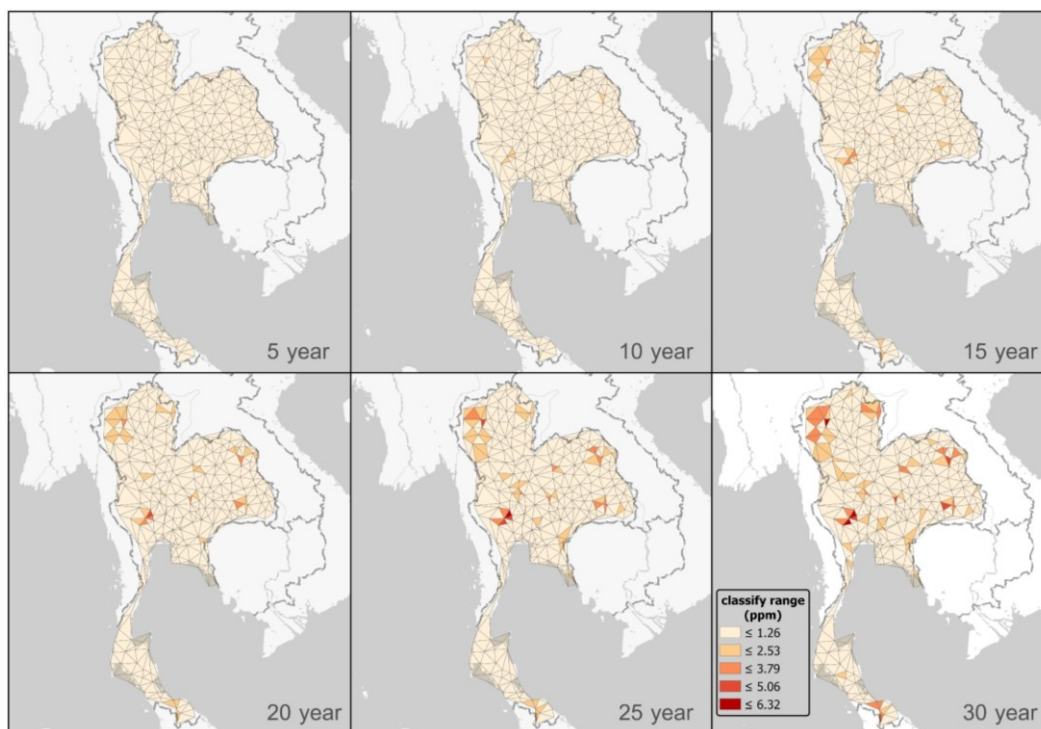
(Triangle Loops) ทั้งสิ้น 447 รูป มีขนาดพื้นที่ของรูปเหลี่ยมอยู่ที่ 161,232.503 ตร.ม. โดยรูปสถานี PJRK-KKJN-BGSP มีขนาดพื้นที่มากที่สุด 378,446.356 ตร.ม. และรูปสถานี DPT9-SBKK-PKKT มีขนาดพื้นที่น้อยสุด 36,883.954 ตร.ม.



รูปที่ 12 แผนที่แสดงตำแหน่งสถานี CORS ทั้ง 261 สถานี (ซ้าย) และแผนที่โครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS (ขวา)

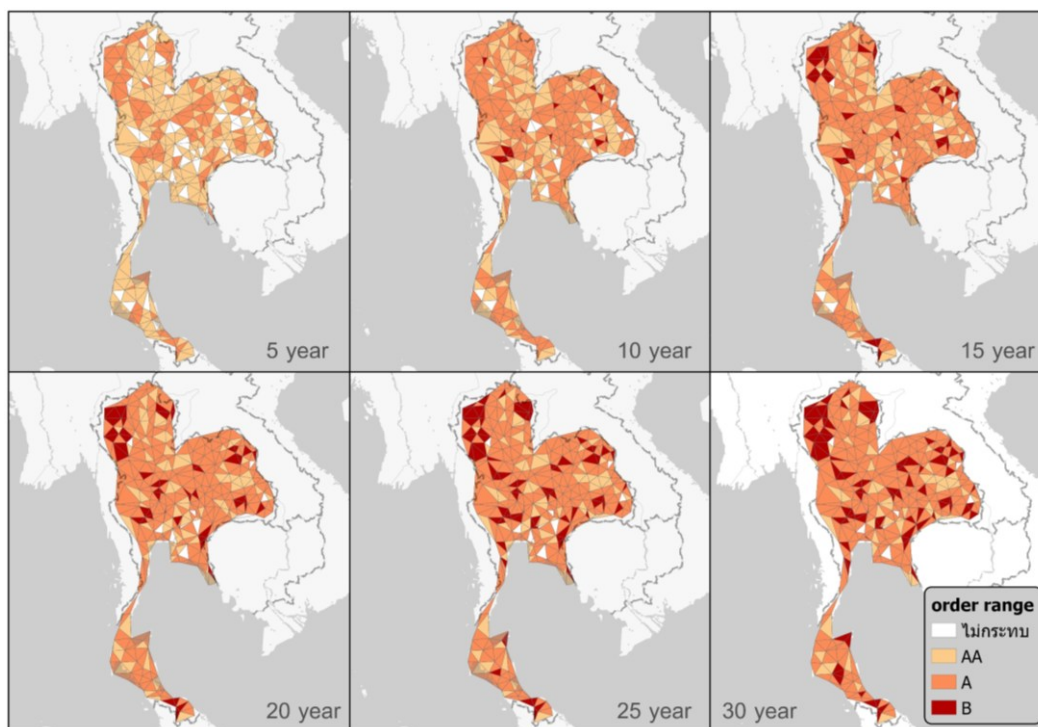
3.2.2 การปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS

จากการคำนวณหาการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ในรูปแบบอัตราส่วน ppm (Parts Per Million) ดังแสดงในสมการที่ (4) (5) และ (6) ในช่วงระยะเวลาอีก 5 ปี 10 ปี 15 ปี 20 ปี 25 ปี และ 30 ปีข้างหน้า โดยการหาระยะทางรอบรูปสามเหลี่ยมที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละปีเทียบกับระยะทางรอบรูปสามเหลี่ยม ณ Epoch 2024.0 ซึ่งเป็นระยะทางในระบบพิกัดสามมิติ (3D Distance) พร้อมทั้งมีการจำแนกประเภท (Classify) ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 5 ช่วงด้วยเทคนิคการแบ่งช่วงที่เท่ากัน (Equal Interval) และแสดงผลข้อมูลในรูปแบบแผนที่ภาพ ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่า ในระยะเวลา 5 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.10 ppm โดยรูปสถานี LCNT-MKRI-SMCK มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 0.87 ppm และมี 15 รูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบ ในระยะเวลา 10 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.23 ppm โดยรูปสถานี LCNT-MKRI-SMCK มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 1.96 ppm และมี 5 รูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบ ในระยะเวลา 15 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.36 ppm โดยรูปสถานี LCNT-MKRI-SMCK มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 3.05 ppm และมี 4 รูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบ ในระยะเวลา 20 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.49 ppm โดยรูปสถานี LCNT-MKRI-SMCK มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 4.14 ppm และมี 2 รูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบ ในระยะเวลา 25 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.62 ppm โดยรูปสถานี LCNT-MKRI-SMCK มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 5.23 ppm และมี 2 รูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบ และในระยะเวลา 30 ปี มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบเฉลี่ยอยู่ที่ 0.75 ppm โดยรูปสถานี LCNT-MKRI-SMCK มีการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ 6.32 ppm และมี 2 รูปที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบ



รูปที่ 13 แผนที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ในประเทศไทย ช่วงระยะเวลาอีก 5 ปี 10 15 20 25 และ 30 ปีข้างหน้า

และเมื่อลองพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนในการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS เทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องของลำดับชั้นงานสำรวจจริงวัดด้วยดาวเทียมที่หน่วยงาน FGCS กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 1 พร้อมทั้งแสดงผลในรูปแบบแผนที่ที่ภาพดังแสดงในรูปที่ 14 พบว่า ในระยะเวลา 5 ปี ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีนัยส่งผลกระทบต่อเกณฑ์ชั้นงาน AA จำนวน 252 จุด คิดเป็น 56.38% ของพื้นที่ ชั้นงาน A จำนวน 144 จุด คิดเป็น 32.21% และมีจำนวน 51 จุด คิดเป็น 11.41% ของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ ในระยะเวลา 10 ปี ส่งผลกระทบต่อเกณฑ์ชั้นงาน AA จำนวน 141 จุด คิดเป็น 31.54% ของพื้นที่ ชั้นงาน A จำนวน 272 จุด คิดเป็น 60.85% ชั้นงาน B จำนวน 13 จุด คิดเป็น 2.91% และมีจำนวน 21 จุด คิดเป็น 4.7% ของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ ในระยะเวลา 15 ปี ส่งผลกระทบต่อเกณฑ์ชั้นงาน AA จำนวน 101 จุด คิดเป็น 22.6% ของพื้นที่ ชั้นงาน A จำนวน 296 จุด คิดเป็น 66.22% ชั้นงาน B จำนวน 37 จุด คิดเป็น 8.28% และมีจำนวน 13 จุด คิดเป็น 2.91% ของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ ในระยะเวลา 20 ปี ส่งผลกระทบต่อเกณฑ์ชั้นงาน AA จำนวน 81 จุด คิดเป็น 18.12% ของพื้นที่ ชั้นงาน A จำนวน 302 จุด คิดเป็น 67.56% ชั้นงาน B จำนวน 54 จุด คิดเป็น 12.08% และมีจำนวน 10 จุด คิดเป็น 2.24% ของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ ในระยะเวลา 25 ปี ส่งผลกระทบต่อเกณฑ์ชั้นงาน AA จำนวน 67 จุด คิดเป็น 14.99% ของพื้นที่ ชั้นงาน A จำนวน 293 จุด คิดเป็น 65.55% ชั้นงาน B จำนวน 78 จุด คิดเป็น 17.45% และมีจำนวน 9 จุด คิดเป็น 2.01% ของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ และในระยะเวลา 30 ปี ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีนัยส่งผลกระทบต่อเกณฑ์ชั้นงาน AA จำนวน 54 จุด คิดเป็น 12.08% ของพื้นที่ ชั้นงาน A จำนวน 288 จุด คิดเป็น 64.43% ชั้นงาน B จำนวน 97 จุด คิดเป็น 21.70% และมีจำนวน 8 จุด คิดเป็น 1.79% ของพื้นที่ที่ไม่ได้รับผลกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 แผนที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS เทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องของลำดับชั้นงานสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมที่หน่วยงาน FGCS กำหนด

ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนในการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS เทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องของลำดับชั้นงานที่กำหนดโดย FGCS						
เกณฑ์ชั้นงาน	ช่วงระยะเวลา 5 ปี		ช่วงระยะเวลา 10 ปี		ช่วงระยะเวลา 15 ปี	
	จำนวนรูป	เปอร์เซ็นต์	จำนวนรูป	เปอร์เซ็นต์	จำนวนรูป	เปอร์เซ็นต์
ไม่กระทบ	51	11.41	21	4.70	13	2.91
AA	252	56.38	141	31.54	101	22.60
A	144	32.21	272	60.85	296	66.22
B	0	0.00	13	2.91	37	8.28
C-1	0	0.00	0	0.00	0	0.00
รวม	447	100.00	447	100.00	447	100.00

เกณฑ์ชั้นงาน	ช่วงระยะเวลา 20 ปี		ช่วงระยะเวลา 25 ปี		ช่วงระยะเวลา 30 ปี	
	จำนวนรูป	เปอร์เซ็นต์	จำนวนรูป	เปอร์เซ็นต์	จำนวนรูป	เปอร์เซ็นต์
ไม่กระทบ	10	2.24	9	2.01	8	1.79
AA	81	18.12	67	14.99	54	12.08
A	302	67.56	293	65.55	288	64.43
B	54	12.08	78	17.45	97	21.70
C-1	0	0.00	0	0.00	0	0.00
รวม	447	100.00	447	100.00	447	100.00

รูปที่ 15 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องที่หน่วยงาน FGCS กำหนด

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ประมวลผลข้อมูลดาวเทียมที่รับวัดด้วยระบบดาวเทียม GPS ของโครงข่ายการรับวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ในช่วงปี พ.ศ. 2562-พ.ศ. 2566 ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 5 ปี ในแต่ละปีมีจำนวนสถานีที่ไม่เท่ากันคือ 159 229 239 293 และ 298 สถานี ตามลำดับ ด้วยเทคนิคการหาตำแหน่งแบบจุดเดี่ยวความละเอียดถูกต้องสูง โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย GipsyX 2.2 เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ค่าพิกัดรายวันที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง ต่อจากนั้นจึงทำการพล็อตกราฟอนุกรมเวลาของสถานี CORS แยกกันในแต่ละแนวแกนพิกัด E N และ U จากความสัมพันธ์ระหว่างวันที่กับตำแหน่ง และได้มีการกำจัดตัวแปรต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องและแม่นยำในการใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เช่น การกำจัดข้อมูลที่ผิดปกติ การปรับค่าความสูงของจานรับสัญญาณดาวเทียม และการตัดสถานี CORS ที่ไม่เสถียรออกไป จนเหลือจำนวนสถานีที่เหมาะสมทั้งสิ้น 261 สถานี แล้วจึงนำข้อมูลเหล่านี้ไปศึกษาและวิเคราะห์ด้วยวิธีการที่ใช้ในการวิจัยเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ ประการแรก คือ ศึกษาถึงพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทย โดยผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลอนุกรมเวลา ความเร็ว และทิศทางการเคลื่อนตัว แสดงให้เห็นว่า สถานี CORS ในประเทศไทยมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอและทิศทางที่สอดคล้องกันไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ที่มุมอะซิมัทเฉลี่ย $106^{\circ} 29' 42.4''$ และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 29 มม./ปี โดยมีแนวโน้มอัตราการเปลี่ยนแปลงที่สูงสุดในแนวแกน E รองลงมาคือแนวแกน N และแนวแกน U ตามลำดับ และจากข้อมูลรูปแบบการเคลื่อนตัวที่เป็นวัฏจักรรายปี บ่งชี้ว่า ตำแหน่งพิกัดมีความผันผวนตามฤดูกาลสูงสุดในแนวแกน U รองลงมาคือแนวแกน E และแนวแกน N ตามลำดับ ในขณะที่ผลการประมาณค่าในช่วงเพื่อสร้างพื้นผิวด้วยวิธีการ IDW โดยอาศัยข้อมูลกลุ่มที่จำแนกด้วยเทคนิค K-Means มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของสถานี CORS นอกจากนี้พบว่าพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ที่มีขนาดของความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าเกณฑ์เฉลี่ยปกติ ส่วนใหญ่เกิดจากอิทธิพลของรอยเลื่อนที่มีพลังในประเทศไทย

ประการที่สอง คือ ศึกษาผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ต่อการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS โดยผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวล พบว่า ทั้งความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของตำแหน่งสถานี CORS ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการปิดบรรจบของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ในระยะยาว โดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.10 ppm 0.23 0.36 0.49 0.62 และ 0.75 ppm ในอีก 5 ปี 10 15 20 25 และ 30 ปี ข้างหน้าตามลำดับ และเมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดในช่วงระยะเวลาอีก 30 ปี นับจาก Epoch 2024.0 การเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS จะส่งผลกระทบต่อการปิดบรรจบเฉลี่ยของโครงข่ายสามเหลี่ยมสถานี CORS ในบริเวณพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศไทยเทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องของลำดับชั้นงานสำรวจรับวัดด้วยดาวเทียมที่หน่วยงาน FGCS กำหนด อยู่ในลำดับชั้นงาน A ($1 : 10,000,000$ หรือ 0.1 ppm) คิดเป็น 59.47% ของพื้นที่ ชั้นงาน AA ($1 : 100,000,000$ หรือ 0.01 ppm) คิดเป็น 25.95% และส่งผลกระทบอยู่ในลำดับชั้นงาน B ($1 : 1,000,000$ หรือ 1 ppm) คิดเป็น 10.40% โดยมีขนาดของค่าความคลาดเคลื่อน (ppm) ที่มากเมื่อมีช่วงระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น และมีบริเวณบางรูปสามเหลี่ยมเท่านั้นที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการเคลื่อนตัวของสถานี CORS คิดเป็นประมาณ 4.18% ของพื้นที่ และพบว่า ในบริเวณพื้นที่ที่แนวรอยเลื่อนที่มีพลังในประเทศไทยพาดผ่านมีอิทธิพลต่อค่าความ

คลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาด้วย แต่โดยรวมแล้วรูปหรือพื้นที่ส่วนใหญ่ของโครงข่ายสามเหลี่ยม
สถานี CORS ในประเทศไทย มีค่าความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในระยะยาวที่
ยังคงสม่ำเสมอและสอดคล้องกัน

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวของตำแหน่งสถานี CORS ในประเทศไทยมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ
และทิศทางที่สอดคล้องกัน และยังเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการเข้าบรรจบที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละ
ช่วงเวลา อีกทั้งยังสะท้อนถึงการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นหากไม่นำปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้มาพิจารณาในการ
วิเคราะห์ข้อมูลอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนได้

4.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษา วิเคราะห์ และติดตามข้อมูลอนุกรมเวลาตำแหน่งของสถานี CORS ในประเทศไทยอย่างต่อเนื่อง เพราะ
แนวโน้มการเคลื่อนตัว (Movement Trends) ของสถานี CORS เหล่านี้ บ่งชี้ถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกอันเกิด
จากกิจกรรมต่าง ๆ ทางธรณีวิทยาได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์อย่างมากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลาย เช่น การ
ตรวจสอบความเสถียรของโครงสร้างอาคาร การสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแผ่นเปลือกโลกบริเวณประเทศไทย และการ
ประเมินความเสี่ยงจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ กองเทคโนโลยีท่าแพนที่ กรมที่ดิน ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้
และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ เจริญผล ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ รวมถึง
เทคนิคต่าง ๆ ในการจัดการ ประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลที่มีจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพและบรรลุผลตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Matthews, K. J., Maloney, K. T., Zahirovic, S., Williams, S. E., Seton, M., & Müller, R. D. (2016). Global plate boundary evolution and kinematics since the late Paleozoic. *Global and Planetary Change*, 146, 226-250. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.002> [Accessed 5 June 2024].
- [2] กรกฎ บุตรวงษ์. (2563). การศึกษาเปรียบเทียบการแปลงพิกัดพื้นฐานระหว่างกรอบพิกัดอ้างอิงสากล ITRF2005 และ ITRF2008 ในประเทศไทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. Available from: <http://doi.org/10.58837/CHULA.THE.2020.1152> [Accessed 8 June 2024].

- [3] Rizos, C., & Satirapod, C. (2011). Contribution of GNSS CORS infrastructure to the mission of modern geodesy and status of GNSS CORS in Thailand. *Engineering Journal*; Vol 15, No 1 (2011): Geo-Informatics; 25-42, 15. Available from: <https://doi.org/10.4186/ej.2011.15.1.25> [Accessed 21 August 2024].
- [4] Jagoda, M. (2021). Determination of Motion Parameters of Selected Major Tectonic Plates Based on GNSS Station Positions and Velocities in the ITRF2014. *Basel*, 21(16). Available from: <https://doi.org/10.3390/s21165342> [Accessed 9 June 2024].
- [5] Alim Sikder, M. A., Wu, F., & Zhao, Y. (2018). Displacement Monitoring of CORS Reference Stations Using GNSS Precise Point Positioning in Bangladesh 2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, China, 12-16 August 2018, pp. 1060-1064.
- [6] Tran Dinh, T., Nguyen, D. H., Vu, N. Q., & Nguyen, Q. I. (2023). Crustal displacement in Vietnam using CORS data during 2018 - 2021. *Earth Sciences Research Journal*, 27(1), 27-36. Available from: <https://doi.org/10.15446/esrj.v27n1.102630> [Accessed 9 July 2024].
- [7] Kouba, J., Lahaye, F., & Tétreault, P. (2017). Precise Point Positioning. In P. J. G. Teunissen & O. Montenbruck (Eds.), *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems* (pp. 723-751). Springer International Publishing. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_25 [Accessed 9 June 2024].
- [8] กองเทคโนโลยีทำแผนที่. แนวทางการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). กรมที่ดิน, กระทรวงมหาดไทย, กันยายน, 2563.
- [9] Charoenkalunyuta, T., Satirapod, C., Keitniyomrung, V., & Yomwan, P. (2019). Performance of Network-Based RTK GNSS for the Cadastral Survey in Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 15(3), 13–19. Available from: <https://journals.sfu.ca/ijg/index.php/journal/article/view/1847> [Accessed 10 June 2024].
- [10] Teunissen, P., & Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing. Available from: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1> [Accessed 27 June 2024].