การประยุกต์ใช้ข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง จังหวัดตาก

Application of Data from GNSS Continuously Operating Reference Station for Monitoring the Mine Wall in Padaeng Mine Tak

ภาณุพล เล็กประเสริฐ[1] พีรภพ โพธิ์พงษ์[1 *]

[1]สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
41/1 หมู่ 7 ตำบลไม้งาม อำเภอเมืองตาก จังหวัดตาก ประเทศไทย 63000

Panupon Lekprasert[1], Perapop Popong[1 *]

[1]Department of Civil and Environmental Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak
41/1 Moo 7 Mai Ngam Subdistrict Mueang Tak District Tal Province Thailand 63000

[*]ผู้รับผิดชอบบทความ: perapop_p@rmutl.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-7845-5423

Received: 9 October 2022, Revised: 19 May 2023, Accepted: 15 June 2023

บทคัดย่อ

สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเป็นสถานีที่จัดสร้างไว้สำหรับการรับและส่งข้อมูลสัญญาณดาวเทียมไปยังส่วนควบคุมซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบโครงข่ายจลน์ในทันที ปัจจุบันจะใช้สำหรับงานสำรวจแปลงที่ดินจัดสร้างโดยโดยกรมที่ดิน งานวิจัยนี้จึงนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาประมวลเป็นสถานีฐานสำหรับตรวจสอบการเคลื่อนตัวผนังเหมืองผาแดงจังหวัดตากโดยใช้การรังวัดแบบสถิตอย่างเร็ว โดยแบ่งการทดสอบเป็น 3 ขั้นตอนคือ 1. การทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่เหมืองผาแดง พบว่าสถานีแม่สอด จังหวัดตาก มีความเหมาะสมมากที่สุด ซึ่งดีกว่าการใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่อยู่ไกลมาร่วมประมวลผล 2. ทดสอบความถูกต้องของค่าพิกัดโดยใช้ค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม พบว่าค่ามีความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งเฉลี่ยเท่ากับ ± 0.020 เมตรและ ± 0.040 เมตร ตามลำดับ 3. การทดสอบหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงโดยกำหนดจุดทดสอบ 12 จุดที่ครอบคลุมพื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดการเคลื่อนตัว พบว่าผนังเหมืองผาแดงมีการเคลื่อนตัวที่น้อยมากโดยค่าพิกัดแนวราบมีเคลื่อนตัวไม่เกิน 0.002 เมตร และพิกัดแนวดิ่งมีการขยับตัวไม่เกิน 0.003 เมตร

คำสำคัญ การรังวัดด้วยดาวเทียม สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร ดินถล่ม งานเหมืองแร่

Abstract

Continuously operating reference station is a station established for the immediate reception and transmission of satellite data to the control stations as part of the network RTK in Thailand for Cadastral Surveying created by the Department of Lands. In this research, the satellite signal data from the continuously operating reference station is compiled as a reference station for checking the wall movement of Pha Daeng mine in Tak province by using rapid static survey. There are three steps to testing. The first step is testing for a suitable continuously operating reference station for the Pha Daeng mine area. It was found that Mae Sot Station in Tak Province was

the most suitable. The second step is testing the accuracy of the coordinates by using the coordinates obtained from the GNSS survey to compare them with the coordinates obtained from the total station. It was found that the accuracy of the average horizontal and vertical coordinates was ±0.020 meters and ±0.040 meters, respectively. The third step is testing for the displacement of the walls of Pha Daeng mine by specifying 12 test points covering the area prone to displacement. It was found that the walls of Pha Daeng mine had less movement, with the horizontal rating of no more than 0.002 meters and the vertical rating of no more than 0.003 meters.

Keywords: GNSS, CORS, Landslide, Mining

1. บทนำ

เหมืองผาแดงตั้งอยู่ที่ตำบลพระธาตุผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก เป็นเหมืองสังกะสีที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย เนื้อที่รวม 2,077 ไร่ ได้รับสัมปทานขุดขนแร่สังกะสีโดยบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) ซึ่งปัจจุบันได้หมดสัมปทานและยุติการทำเหมืองในพื้นที่ดังกล่าวไปแล้ว ได้ส่งมอบพื้นที่คืนให้กรมป่าไม้ดูแลต่อไปและมีแผนดำเนินการจัดทำเหมืองผาแดงให้เป็น สวนพฤกษศาสตร์ผาแดง ตามแนวพระราชดำริของสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้ากรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯสยามบรมราชกุมารี เพื่อที่จะฟื้นฟู อนุรักษ์ ขยายพันธ์ป่าไม้ในพื้นที่ให้อุดมสมบูรณ์เหมือนเดิมรวมถึงพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวต่อไป ในอนาคต โดยความร่วมมือของกรมป่าไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช องค์การสวนพฤกษศาสตร์ ทส. และบริษัท ผาแดงอินดัสทรี จำกัด (มหาชน) โดยจะทำในรูปแบบของสวนเอเดน (The Eden Project) ประเทศอังกฤษ ซึ่งเป็นที่เก็บรักษาพันธุ์พืชต่างๆ ทั่วโลกแต่เดิมก็เคยเป็นเหมืองแร่มาก่อนเช่นเดียวกัน [1],[2]

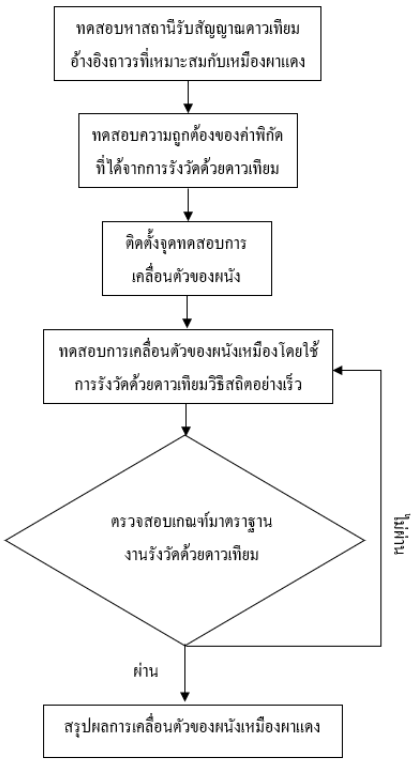
จากที่กล่าวขั้นต้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ควรหาวิธีในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เนื่องจากสภาพภูมิประเทศของพื้นที่ทำเหมืองเป็นลักษณะของภูเขาที่มีความสูงชัน พื้นดินบางส่วนถูกน้ำกัดเซาะและมีร่องรอยการถล่มเกิดขึ้น อีกทั้งพื้นที่เหมืองยังอยู่ใกล้รอยเลื่อนของเปลือกโลกที่มีโอกาสเกิดแผ่นดินไหวขึ้นได้ โดยการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างประเทศจีนที่นำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมโดยใช้เทคนิค Satellite-Based Augmentation Systems (SABS) และInterferometric Syntheti Aperture Radar (InSAR) มาทำการตรวจสอบสภาพการเปลี่ยนแปลงของเหมืองและเสถียรภาพของตัวเหมืองบริเวณเทือกเขาเทียนชานและยังมีการนำอากาศไร้คนขับมาทำการวางแผนในการขุดเหมือง ประเมินผลกระทบสิ่งแวดล้อมและตรวจสอบเสถียรภาพของผนังเหมือง [3],[4] ส่วนประเทศแถบทวีปยุโรปและทวีปแอฟริกาใต้ได้มีการนำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมมาใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวเหมือง รวมถึงใช้ในการวางแผนและขุดขนถ่านหินเช่นกัน [5-7] ในส่วนของเหมืองแม่เมาะ ประเทศไทย ได้นำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียม การใช้กล้องประมวลผลรวมแบบอัตโนมัติ (Robotic Total Station) การใช้เครื่องสแกนเนอร์ และการใช้คลื่นเรดาร์ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง การวางแผนและการหาปริมาตรการขุดขนทรัพยากรในเหมือง [8] จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองที่หลากหลาย ทำให้ผู้ประกอบการเหมืองแร่หรือหน่วยงานที่ดูแลเหมืองแร่สามารถเลือกใช้เทคโนโลยีให้เหมาะสมกับงบประมาณและลักษณะทางกายภาพของเหมืองนั้น ๆ สำหรับการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเหมืองผาแดงควรเลือกใช้วิธีการตรวจสอบที่ไม่ซับซ้อน ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบไม่สูงมาก เนื่องจากเป็นเหมืองที่ปิดตัวลงแล้วไม่ได้มีหน่วยงานที่เชี่ยวชาญด้านเหมืองแร่ดูแลรับผิดชอบ ซึ่งวิธีการเหมาะสมในการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของเหมืองผาแดงคือการใช้เทคโนโลยีการรังวัดด้วยดาวเทียมเพราะเป็นวิธีที่มีการใช้งานที่ไม่ซับซ้อน ราคาของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบไม่สูงมาก

และใช้กำลังคนในการดำเนินงานเพียงคนเดียวก็สามารถเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองได้

ในปัจจุบันกรมที่ดินได้พัฒนาระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (RTK GNSS Network) สำหรับใช้ในการรังวัดแปลงที่ดินให้มีความถูกต้องและมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น [9] ซึ่งจากการทดสอบการหาความถูกต้องเชิงตำแหน่งพบว่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตรซึ่งสามารถใช้ในการรังวัดแปลงที่ดินได้ เนื่องจากระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีจะมีสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร (Continuously Operating Reference Station, CORS) ส่วนประกอบของระบบ โดยการทำงานของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมีหน้าที่ในการรับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมตลอดเวลาและส่งข้อมูลสัญญาณที่ได้ไปยังส่วนควบคุม (Server) ซึ่งสามารถนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร มาใช้ในการรังวัดตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองได้ โดยลงทะเบียนขอใช้งานระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีได้ผ่านระบบออนไลน์ของกรมที่ดิน ในปัจจุบันพบว่ามีสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ใกล้กับเหมืองผาแดง จังหวัดตากมีอยู่ 3 สถานีคือ สถานีแม่สอด สถานีอุ้มผาง และสถานีบ้านตาก จึงสามารถนำสถานีเหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อให้การตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงมีความสะดวกยิ่งขึ้น อีกทั้งยังใช้ประโยชน์จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรให้คุ้มค่ามากยิ่งขึ้นด้วย

2. ทฤษฎีและวิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จะเริ่มจากการทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับเหมืองผาแดง โดยคัดเลือกสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่อยู่ใกล้กับเหมืองผาแดงจำนวน 3 สถานีและนำข้อมูลสัญญาณดาวเดียวมาประมวลผลเป็นสถานีฐานเพื่อทดสอบกับหมุดควบคุมที่มีอยู่บริเวณเหมืองผาแดง เมื่อได้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับเหมืองผาแดงแล้วจะทำการทดสอบหาความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม โดยนำข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาเป็นสถานีฐานและทำการทดสอบหาค่าพิกัดด้วยวิธีสถิตอย่างเร็ว โดยทดสอบ 4 รูปแบบคือ การใช้สถานีแม่สอด สถานีบ้านตาก และสถานีอุ้มผางสลับกันเป็นสถานีฐานทีละสถานีและแบบสุดท้ายจะนำสถานีทั้งสามเป็นสถานีฐานทั้งหมด จากนั้นนำค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม ทำการติดตั้งจุดทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง หลังจากนั้นทำการรังวัดด้วยดาวเทียมวิธีสถิตอย่างเร็วในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง และตรวจสอบมาตรฐานการรังวัดด้วยดาวเทียมโดยอ้างอิงมาตรฐาน Federal Geodetic Control Committee 1989 (FGCC 1989) [10] ถ้าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานจะทำการรับสัญญาณดาวเทียมใหม่ จากนั้นจะนำค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแต่ละครั้งมาทำการเปรียบเทียบหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง ดังรูปที่ 1

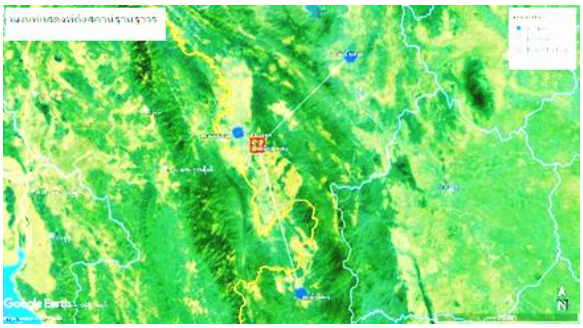


รูปที่ 1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

2.1 การทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับเหมืองผาแดง

เนื่องจากสถานีโครงข่ายดาวเทียมอ้างอิงถาวรของกรมที่ดินมีกระจายอยู่ทั่วประเทศไทย โดยอ้างอิงจากเอกสารประชาสัมพันธ์กรมที่ดินได้กล่าวไว้ว่าในปี 2563 มีสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรจำนวน 134 สถานีและมีแผน

ขยายสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเพิ่มเติมในปี 2564 จำนวน 47 สถานี รวมเป็นทั้งสิ้น 181 สถานี ดังนั้นจึงควรทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมกับพื้นที่ดำเนินงานวิจัย โดยความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการรังวัดด้วยดาวเทียมจะแปรผันตามประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย โดย Charoenkalunyuta T, et al. พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งแปรผันตามระยะทางของเส้นฐานทั้งทางราบและทางดิ่งโดยระยะทางของเส้นฐานที่มีระยะทางที่ไกลจากหมุดทดสอบจะให้ค่ารากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่มากขึ้น [11] งานวิจัยนี้จึงเลือกจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ใกล้กับเหมืองผาแดงจำนวน 3 สถานี คือ สถานีแม่สอด สถานีบ้านตาก และสถานีอุ้มผาง ซึ่งมีระยะห่างกับจุดที่ทำการทดสอบเป็นระยะเท่ากับ 11.110 กิโลเมตร 61.631 กิโลเมตร และ 74.330 กิโลเมตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 2 เนื่องจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้ง 3 สถานีนี้มีระยะทางที่ใกล้กับเหมืองผาแดงที่สุด



รูปที่ 2 แผนที่ตำแหน่งเหมืองผาแดงและจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

จากนั้นทำการทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสมโดยนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้ง 3 มาทำการรับสัญญาณดาวเทียมร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัย โดยให้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรเป็นสถานีฐานและใช้ค่าพิกัดจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแต่ละสถานีเป็นจุดที่ใช้อ้างอิงค่าพิกัดสถานีฐาน สำหรับจุดที่ใช้ทดสอบความถูกต้องของค่าพิกัดจะใช้หมุดควบคุมที่ทำการรังวัดหาค่าพิกัดโดยใช้มาตรฐานการรังวัดด้วยดาวเทียมชั้นที่ 1 บริเวณเหมืองผาแดงจำนวน 4 จุด เป็นจุดทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่เหมาะสม โดยเปรียบเทียบจากค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบและแนวดิ่งระหว่างค่าพิกัดของจุดทดสอบและค่าพิกัดที่ได้จากการใช้ข้อมูลดาวเทียมของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาร่วมประมวลผล ดังสมการที่ (1) และ (2)

สมการที่ (1) ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบ

$$error_H = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2} \quad (1)$$

เมื่อ $error_H$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบ

ΔN คือ ค่าความแตกต่างของพิกัดระหว่างพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้ของจุดทดสอบและพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้จากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

ΔE คือ ค่าความแตกต่างของพิกัดระหว่างพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตกของจุดทดสอบและพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตกจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

สมการที่ (2) ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวดิ่ง

$$error_V = Z_T - Z_C \quad (2)$$

เมื่อ $error_V$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวดิ่ง

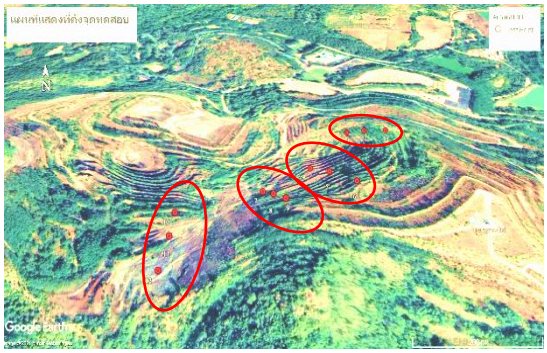
Z_T คือ ค่าพิกัดทางดิ่งของจุดทดสอบ

Z_C คือ ค่าพิกัดทางดิ่งจากการใช้ข้อมูล ของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร

2.2 การทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

1. การกำหนดจุดทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง จะทำการเลือกผนังเหมืองที่เคยเกิดการถล่มหรือบริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดถล่ม โดยดูจากลักษณะของความลาดชันที่มีมากเกินไป มีร่องรอยของทางน้ำหรือมีน้ำขัง มีรอยแตกตามยอดของความลาดชัน หน้าผนังเหมืองมีการเปลี่ยนรูป เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ผนังเหมืองจะถูกน้ำจากธรรมชาติกัดเซาะ งานวิจัยนี้จึงเลือกผนังทางทิศตะวันออกและทิศใต้ซึ่งมีความลาดชันที่สูงมากกว่าบริเวณอื่นๆในเหมืองและมีมวลของดินที่อยู่ด้านบนของขอบบ่อเหมืองที่มากทำให้บริเวณนี้มีโอกาสเกิดการถล่มมากที่สุด หลังจากที่ได้ศึกษาลักษณะทาง

กายภาพของบ่อเหมืองด้วยสายตาแล้ว จะแบ่งผนังเหมืองออกเป็น 3 ชั้นแต่ละชั้นจะมีจุดทดสอบที่หล่อด้วยคอนกรีตมีขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 0.2 เมตร และลึก 0.5 เมตรตรงกลางวางหมุดที่เป็นสแตนเลสเพื่อใช้สำหรับตั้งอุปกรณ์ทดสอบ ทำให้มีจำนวนจุดทดสอบชั้นละ 4 จุดแต่ละชั้นจะสูงห่างกันประมาณ 20 เมตรจำนวน 3 ชั้นรวมทั้งสิ้น 12 จุด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งของจุดทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

2. การทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม จะใช้ค่าพิกัดของกล้องประมวลผลรวมเป็นค่าเปรียบเทียบในการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพิกัด โดยจะทำการรังวัดด้วยดาวเทียมที่จุดทดสอบที่สร้างไว้ 12 จุดด้วยวิธีสถิตอย่างเร็ว ใช้เวลาในการรับสัญญาณดาวเทียมจุดละ 1 ชั่วโมง Epoch ละ 1 วินาที จากนั้นนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมมาทำการประมวลผลโดยให้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแม่สอดเป็นสถานีฐาน เมื่อได้ค่าพิกัดของการรังวัดด้วยดาวเทียมเสร็จสิ้นแล้วจะใช้กล้องประมวลผลรวมเก็บข้อมูลค่าพิกัดที่จุดทดสอบเดียวกันกับการรังวัดด้วยดาวเทียม โดยตั้งกล้องประมวลผลรวมและเป้าสะท้อนธงหลังบริเวณหมุดควบคุมหลักที่อยู่บริเวณเหมืองผาแดง จากนั้นจะทำการตั้งเป้าสะท้อนที่จุดทดสอบ ทำการวัดความสูงของกล้องประมวลผลรวมและเป้าสะท้อน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลค่ามุมและระยะทางแล้วนำข้อมูลมาคำนวณค่าพิกัดเพื่อที่จะนำข้อมูลมาทำการเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมกับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม โดยตั้งสมมุติฐานให้ค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวมมีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่มีความน่าเชื่อถือ โดยพิจารณาจากค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Means Square Error) หรือเขียนย่อว่า RMSE ในแนวราบและแนวดิ่ง ดังสมการที่ (3) และ (4) เมื่อผลของการทดสอบเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ โดยค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบต้องไม่เกิน 3 เซนติเมตรและค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวดิ่งต้องไม่เกิน 5 เซนติเมตร

สมการที่ (3) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบ

$$RMSE_H = \sqrt{\frac{\sum(N_t - N_s)^2 + \sum(E_t - E_s)^2}{n}} \quad (3)$$

เมื่อ $RMSE_H$ คือ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวราบ

N_t, N_s คือ ค่าพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้ของกล้องประมวลผลรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

E_t, E_s คือ ค่าพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตกของกล้องประมวลผลรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

n คือ จำนวนหมุดทดสอบ

สมการที่ (4) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวดิ่ง

$$RMSE_V = \sqrt{\frac{\sum(Z_t - Z_s)^2}{n}} \quad (4)$$

เมื่อ $RMSE_V$ คือ ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยในแนวดิ่ง

Z_t, Z_s คือ ค่าพิกัดทางดิ่งของกล้องประมวลผลรวมและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

2.3 การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

1. การเก็บข้อมูลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง ในการทดสอบหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองจะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทำการรับสัญญาณด้วยวิธีสถิตอย่างเร็ว (Rapid Static Survey) โดยอาศัยข้อมูลจากจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแม่สอดมาร่วมประมวลผลเป็นสถานีฐาน จากนั้นจะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรับสัญญาณดาวเทียมที่จุดทดสอบทั้ง 12 จุด แต่ละจุดจะใช้เวลา

ในการรับสัญญาณ 1 ชั่วโมง โดยรับสัญญาณดาวเทียม Epoch ละ 1 วินาที ในการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่จุดทดสอบจะต้องระมัดระวังไม่ให้ตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมคลาดเคลื่อนจากจุดศูนย์กลางของจุดทดสอบ และอ่านค่าความสูงของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมในระดับมิลลิเมตร และควรใช้ขาตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ทำด้วยไม้ที่มีน้ำหนักมากเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากแรงลม โดยทำการบันทึกหมายเลขของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ความสูงของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม เวลาที่เริ่มและสิ้นสุดการรับสัญญาณดาวเทียม เพื่อใช้ในเป็นข้อมูลในการประมวลผล ทำการรับสัญญาณดาวเทียมเดือนละ 1 ครั้งเป็นเวลา 12 เดือนเพื่อนำข้อมูลค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลมาวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง

2.การประมวลผลจะใช้สัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแม่สอดเป็นสถานีอ้างอิงค่าพิกัด มาประมวลผลร่วมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่รังวัดได้จากจุดทดสอบการเคลื่อนตัว กำหนดให้ใช้ทรงรีอ้างอิง WGS84 ทำการแปลงค่าระบบพิกัดเป็นระบบ UTM Zone 47 N ใช้แบบจำลองความสูงยีออยด์ EGM 2008 โดยใช้การปรับแก้แบบลีสท์สแควร์ (Least Square Adjustment) ผ่านซอฟแวร์ที่ชื่อว่า Justin กำหนดค่า RMSE ของพิกัดที่ประมวลผลทางราบและทางดิ่งไม่ให้เกิน 2 เซนติเมตรและ 5 เซนติเมตรตามลำดับ ในกรณีที่ค่า RMSE ของพิกัดไม่ผ่านตามที่กำหนดจะใช้เทคนิคการตัดสัญญาณดาวเทียมที่มีคุณภาพต่ำออกแล้วทำการประมวลผลใหม่

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ผลการทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุด

การทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุดสำหรับใช้ในการเป็นสถานีฐานในงานวิจัยนี้ได้ผลดังตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุดแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแนวราบและแนวดิ่ง และระยะห่างของเส้นฐานจากจุดทดสอบถึงสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรแต่ละสถานีและผลจากการใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้งหมดมาประมวลผลร่วมกัน

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่ดีที่สุด

สถานี	เส้นฐาน (KM)	$error_H$ (M)	$error_V$ (M)
แม่สอด	11.110	0.007	0.009
บ้านตาก	61.632	0.037	-0.368
อุ้มผาง	74.331	0.031	-0.144
สามสถานีร่วม	-	0.025	-0.108

จากตารางที่ 1 แสดงผลการนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก มาเป็นสถานีฐานสำหรับการทดสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดที่หมุดทดสอบน้อยที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.007 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง 0.009 เมตร อันดับสองคือการนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรทั้งหมดมาประมวลผลร่วมกัน มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.025 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง -0.108 เมตร สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรที่มีความคลาดเคลื่อนอันดับสามคือสถานีอำเภออุ้มผาง มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.031 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง -0.144 เมตร สถานีที่มีความคลาดเคลื่อนอันดับสี่คือสถานีอำเภอบ้านตาก มีความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบ 0.037 เมตร และความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางดิ่ง -0.368 เมตร สังเกตุได้ว่าระยะของเส้นฐานมีความสอดคล้องกับความถูกต้องของตำแหน่งค่าพิกัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoenkalunyuta T, et al. [11]

3.2 ผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมกับกล้องประมวลผลรวมเพื่อหาความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม โดยแสดงค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดในแนวราบและแนวดิ่งดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

Point	$RMSE_H$	$RMSE_V$
1	0.014	0.037
2	0.016	0.036
3	0.018	0.037
4	0.019	0.031
5	0.017	0.034
6	0.016	0.031
7	0.017	0.024
8	0.015	0.030
9	0.020	0.024
10	0.019	0.028
11	0.014	0.036
12	0.018	0.023
$\bar{X}$	0.017	0.031

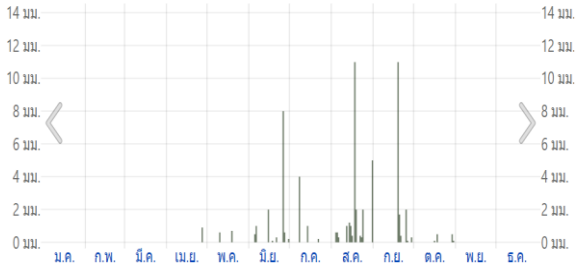
จากตารางที่ 2 พบว่าค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของการทดสอบความถูกต้องของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมมีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบเฉลี่ยเท่ากับ 0.017 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางดิ่งเฉลี่ยเท่ากับ 0.031 เมตร โดยค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบน้อยสุดเท่ากับ 0.014 เมตรสูงสุดเท่ากับ 0.020 เมตร และค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของค่าพิกัดทางดิ่งน้อยสุดเท่ากับ 0.023 เมตรสูงสุดเท่ากับ 0.037เมตร

3.3 ผลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

ผลการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองจะนำค่าเฉลี่ยการเคลื่อนตัวของจุดทดสอบทั้ง 12 จุดมาทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งโดยให้ค่าพิกัดของการทดสอบครั้งที่ 1 เป็นข้อมูลอ้างอิงการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง จากนั้นจะใช้ค่าพิกัดของการทดสอบครั้งที่ 2 ถึงครั้งที่ 12 เป็นตัวเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนตัวตามลำดับ ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 3 ประกอบด้วยค่าทิศทางการเคลื่อนตัวในแนวแกนพิกัดสามมิติและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากจุดทดสอบค่าพิกัดของการทดสอบ

ตารางที่ 3 ผลการเคลื่อนตัวของผนังเหมือง

Point	N (M)	E (M)	Z (M)	SD
1	-0.0002	-0.0007	0.0007	0.0001
2	0.0004	0.0001	0.0009	0.0005
3	-0.0003	0.0002	0.0002	0.0001
4	0.0005	0.0001	0.0005	0.0004
5	-0.0004	0.0004	0.0023	0.0008
6	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005
7	-0.0005	-0.0002	0.0006	0.0001
8	-0.0005	-0.0002	0.0006	0.0001
9	0.0008	0.0010	-0.0001	0.0006
10	0.0008	0.0010	-0.0001	0.0006
11	0.0003	0.0010	-0.0005	0.0003
12	0.0015	-0.0001	0.0004	0.0006
$\bar{X}$	0.0002	0.0003	0.0005	0.0004



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำฝนจากสถานีกรมอุตุนิยมวิทยาสถานีแม่สอด

จากตารางที่ 3 พบว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลค่าพิกัดที่ได้แต่ละจุดทดสอบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ ±0.0004 เมตร แสดงให้เห็นว่าข้อมูลค่าพิกัดของจุดทดสอบที่นำมาวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองมีข้อมูลที่เกาะกลุ่มกันดี โดยมีการเคลื่อนตัวของค่าพิกัดทางแนวเหนือ-ใต้, ค่าพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตก และการเคลื่อนตัวทางดิ่งมากที่สุดเท่ากับ 0.0015 เมตร 0.0010 เมตร และ 0.0023 เมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าพิกัดแต่ละตำแหน่งมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก อาจเป็นเพราะในช่วงที่ทำการเก็บข้อมูลมีปริมาณน้ำฝนที่น้อยดังรูปที่ 4 โดยเดือนสิงหาคมและเดือนกันยายน พ.ศ. 2563 มีปริมาณน้ำฝนสูงสุดอยู่ที่ 11 มิลลิเมตร ทำให้ผนังเหมืองบริเวณที่ทดสอบไม่มีการพังทลายจากปริมาณน้ำฝน

4. บทสรุป

จากการทดสอบหาสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวร (CORS) ที่เหมาะสมกับการนำมาเป็นสถานีฐาน (Base Station) สำหรับหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดง พบว่าสถานีแม่สอด มีความเหมาะสมที่สุดเพราะมีระยะทางที่ใกล้กับเหมืองผาแดงและมีผลของการทดสอบความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งน้อยที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบและทางดิ่งเท่ากับ 0.007 เมตรและ 0.009 เมตรตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการใช้สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรหลายสถานีที่อยู่ไกลจากพื้นที่ เมื่อนำสถานีแม่สอดมาเป็นสถานีฐานสำหรับการทดสอบความถูกต้องของการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียมโดยเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากกล้องประมวลผลรวม (Total Station) พบว่าการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียมมีความถูกต้องของค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งเท่ากับ ± 0.020 เมตรและ ± 0.040 เมตร ตามลำดับ ผลของการตรวจสอบการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงพบว่ามีการเคลื่อนตัวของค่าพิกัดทางแนวเหนือใต้ ค่าพิกัดทางแนวตะวันออก-ตะวันตก และการเคลื่อนตัวทางดิ่งมากที่สุดเท่ากับ 0.0015 เมตร 0.0010 เมตร และ 0.0023 เมตร ตามลำดับ โดยรวมแล้วมีการเคลื่อนตัวในแนวราบไม่เกิน 0.002 เมตร และแนวดิ่งไม่เกิน 0.003 เมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีการเคลื่อนตัวที่น้อยมากไม่ส่งผลต่อสเถียรภาพของผนังเหมืองผาแดง ดังนั้นการนำข้อมูลจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงถาวรมาทำการรังวัดหาการเคลื่อนตัวของผนังเหมืองผาแดงสามารถทำได้โดยที่มีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดเมื่อเทียบกับกับกล้องประมวลผลรวมแล้วไม่เกิน 0.003 เมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้จะไม่สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีถ้าขาดการสนับสนุนจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงขอขอบคุณสำนักจัดการทรัพยากรป่าไม้ที่ 4 จังหวัดตาก ที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกและช่วยประสานงานพื้นที่ดำเนินงานวิจัย ขอบคุณนักศึกษาและอาจารย์สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Thammanu S, Han H, Ekanayake EM, Jung Y, Chung J. The Impact on Ecosystem Services and the Satisfaction Therewith of Community Forest Management in Northern Thailand. Sustainability. 2021; 13(23):13474.

[2] The Information Technology Foundation under the Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn. The Information Technology Foundation under the Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn. learning promotion project for the conservation and restoration of the environment due to the Royal Initiative Tak Province Available from: https://www.princess-it.org/th/ [Accessed 18th September 2019].

[3] Du Q, Li G, Zhou Y, Chai M, Chen D, Qi S, Wu G. Deformation monitoring in an alpine mining area in the Tianshan Mountains based on SBAS-InSAR technology. Advances in Materials Science and Engineering. 2021; 17(1):1-5.

[4] Ren H, Zhao Y, Xiao W, Hu Z. A review of UAV monitoring in mining areas: Current status and future perspectives. International Journal of Coal Science & Technology. 2019; 6:320-33.

[5] Vrublova D, Kapica R, Gibesova B, Mudruňka J, Struś A. Application of GNSS technology in surface mining. Geodesy and cartography. 2016; 42(4):122-8.

[6] Brown N, Kaloustian S, Roeckle M. Monitoring of open pit mines using combined GNSS satellite receivers and robotic total stations. InSlope Stability 2007: Proceedings of the 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering 2007;pp. 417-429.

[7] Boonprakob T, Dumrongchai P. The Study of Effects on Positioning Accuracy Using Real Time Kinematic Satellite Survey in Mae Moh Open-Pit Coal Mine. Engineering Journal Chiang Mai University. 2020; 27(2):78–90. Thai.

[8] Keawaram B, Dumrongchai P. Accuracy Assessment of Survey Methods for Volume Determination of Overburden and Coal Excavations in Large Open Pit Mines. Engng.jCMU. 2019;26(1):59–79. Thai.

[9] Department of Lands. RTK GNSS Network. Bangkok; 2019. Thai.

[10] Hull WV. Geometric geodetic accuracy standards and specifications for using GPS relative positioning techniques. National Geodetic Survey, NOAA; 1989.

[11] Charoenkalunyuta T, Satirapod C, Lee HK, Choi YS. Performance of network-based RTK GPS in low-latitude region: A case study in Thailand. Engineering Journal. 2012;16(5):95–103. Thai.

[12] Jing-Xiang G, Hong H. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring. Procedia Earth and Planetary Science. 2009; 1(1):1081-8.

[13] Tumsri N, Saetern W, Sanitpod S. Movement Monitoring of the Phadaeng Mine Walls by Survey Methods by using the Base Station Data from the Department of Lands and Survey Methods with the Total Stations[dissertation]. Rajamangala University of Technology Lanna Tak; 2019.Thai.