

การศึกษาผลกระทบต่อความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่ง
ด้วยการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ในทันที
บริเวณเหมืองถ่านหินเปิดแม่เมาะ
**The Study of Effects on Positioning Accuracy Using
Real Time Kinematic Satellite Survey in Mae Moh
Open-Pit Coal Mine**

ชนศพล บุญประกอบ^{1,2*} และ พุทธิพล ดำรงชัย¹

Thanatepol Boonprakob^{1,2*} and Puttipol Dumrongchai¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200

² การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220

¹ Chiang Mai University, 52000, Thailand

² Electricity Generator Authority of Thailand (Mae Moh Mine), Lampang, 52220

* E-mail: thanatepol.boo@egat.co.th, Telephone: 0910096544, Fax: 054254323

บทคัดย่อ

การรังวัดด้วยดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกด้วยเทคนิคจลน์ในทันทีอาจเกิดความคลาดเคลื่อนทางพิกัดตำแหน่งอันเป็นผลกระทบจากสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ระยะห่าง ระดับความสูงต่างระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมจรและสถานีถาวร งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาผลกระทบดังกล่าว โดยได้จัดทำหมุดทดสอบให้กระจายอยู่ในบริเวณเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง แบ่งเป็นกลุ่มหมุดที่กำหนดระยะห่างทางราบ และกลุ่มที่กำหนดระยะห่างทางตั้งจากสถานีฐาน การรังวัดแบบจลน์ในทันทีบนหมุดทดสอบจะแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน แล้วนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงจากการรังวัดดาวเทียมแบบสถิต พบว่าค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งทางราบเท่ากับ 2.3 ซม. และทางตั้ง 3.1 ซม. ผลการคำนวณนี้ทำให้ทราบว่าระยะห่างระหว่างสถานีมีผลกระทบต่อความถูกต้องของค่าพิกัด นอกจากนี้แล้วความชื้นและอุณหภูมิในอากาศยังส่งผลต่อการรับสัญญาณดาวเทียมกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก

คำสำคัญ: ดาวเทียมกำหนดตำแหน่ง จลน์ในทันที เหมืองถ่านหินลิกันต์แม่เมาะ ระยะเส้นฐาน ความคลาดเคลื่อนพิกัดตำแหน่ง

ABSTRACT

The satellite survey using Real-time kinematic (RTK) positioning method may have some errors occurred due to the effects of the climate changes overtime and baseline lengths between GNSS (Global Navigation Satellite System) base station and rover. This study aims to investigate the effects. The test points were established around Mae Moh mine’s pit, Lampang province. The test points were separated into 2 groups, increment horizontal and vertical distances. The RTK and GNSS surveyings were operated in rainy season, winter, and summer. The measured values were compared with the standard values acquired by static positioning method. The results revealed that the root-mean-square errors were 2.3 cm and 3.1 cm for horizontal and vertical coordinates, respectively. The results showed the distance

between the two stations affected the accuracy of coordinates. In addition, the air humidity and temperature were obstacle for receiving GNSS signals.

Keywords: GNSS positioning, RTK, Mae Moh lignite coal mine, Baseline length, Position error

1. บทนำ

งานรังวัดปริมาตรดินที่ถูกขุดขนในเหมืองแม่เมาะ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เป็นงานในลักษณะการรังวัดจุดบนภูมิประเทศซึ่งข้อมูลที่รังวัดมาจะยึดโยงอยู่กับหมุดหลักฐานบริเวณหน้างานจุดที่กำหนด พิกัด โดยการรังวัดด้วยดาวเทียมกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก ดังนั้นหมุดหลักฐานจำเป็นต้องมีค่าพิกัดทางอ้อมเดซึ่ที่ถูกต้องที่สุด เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของปริมาตรและการคิดคำนวณค่าใช้จ่าย เหมืองแม่เมาะใช้เทคนิคการรังวัดแบบสถิต (Static survey) ซึ่งถือเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องสูงสุด แต่ใช้เวลาดำเนินการนานและไม่สามารถทราบพิกัดได้ทันทีเนื่องจากวิธีดังกล่าวต้องนำข้อมูลไปผ่านโปรแกรมประมวลผลเฉพาะ [1] อย่างไรก็ตามในการรังวัดเพื่อหาปริมาตรจะต้องดำเนินการเป็นประจำทุกเดือนเพื่อนำมาคิดคำนวณเป็นจำนวนเงินที่ กฟผ. จะต้องจ่ายให้แก่ผู้รับจ้างขุดขนดินและถ่านหิน

ดังนั้น กฟผ. จึงมีแผนงานที่จะพัฒนาการทำงานให้มีประสิทธิภาพและรวดเร็วขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีการสำรวจรังวัดสมัยใหม่ จึงต้องการศึกษาเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic Survey หรือเขียนย่อว่า RTK) ซึ่งทำให้ได้ค่าพิกัดในทันที แต่ด้วยความถูกต้องเชิงตำแหน่งเพียงพอที่จะนำมาใช้แทนการรังวัดแบบสถิตได้ นอกจากนั้นเทคโนโลยีการสำรวจสมัยใหม่อื่นๆที่ กฟผ. มีแผนงานที่จะนำมาใช้ในการสำรวจรังวัดเพื่อหาปริมาตรขุดขนดินและถ่านหิน เช่น เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner หรือเขียนว่า TLS) และอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle หรือเขียนว่า UAV) ล้วนอาศัยเทคนิค RTK ในกระบวนการทำงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ดำเนินการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่ง เช่น สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง ระยะห่าง และระดับความสูงต่างระหว่าง

สถานีรับสัญญาณดาวเทียมจรและสถานีถาวร ในการรังวัดแบบจลน์ในทันที

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

การสำรวจโดยใช้อุปกรณ์สำรวจแบบเดิมในการรังวัดเพื่อหาปริมาตรขุดขนดินและถ่านหิน ยกตัวอย่างเช่น กล้องประมวลผลสำหรับกำหนดตำแหน่งทางราบ และกล้องระดับสำหรับหาความสูงต่ำของพื้นดิน เป็นต้น นอกจากจะใช้เวลาในการดำเนินงานมาก ยังใช้จำนวนคนมาก ซึ่งมีผลต่อค่าใช้จ่ายของแรงงานคนที่มากขึ้นด้วยการเข้ามามีบทบาทของเทคโนโลยีดาวเทียมในงานสำรวจรังวัดในการกำหนดตำแหน่งจึงได้รับความนิยมนอย่างรวดเร็ว หลายภาคส่วนหลายองค์กรเริ่มปรับตัวมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทำให้ลดเวลา ลดจำนวนคนและค่าใช้จ่ายได้อย่างมาก แต่เดิมนั้นเทคโนโลยีดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกมีเพียงระบบดาวเทียมเดี่ยว คือ ระบบจีพีเอส (Global Positioning System หรือ GPS)

ปัจจุบันได้มีระบบดาวเทียมกำหนดตำแหน่งโลกอื่นๆ ถูกพัฒนาขึ้นจนมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกัน เช่น กาลิเลโอ (Galileo) ของสหภาพยุโรป โกลนาส (GLONASS) ของสหพันธรัฐรัสเซีย และ เปย์โด (Beidou) ของสาธารณรัฐประชาชนจีน เป็นต้น ทำให้ในปัจจุบันเราเรียกระบบดาวเทียมเหล่านี้รวมกันว่าระบบดาวเทียมกำหนดตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Navigation Satellite System หรือเขียนย่อว่า GNSS) การมีดาวเทียมจำนวนมากบนท้องฟ้าส่งผลให้การรังวัดด้วยดาวเทียมมีความถูกต้องสูงขึ้น สามารถรังวัดได้รวดเร็วและรับสัญญาณได้เกือบจะครอบคลุมทั่วโลก การรังวัดด้วยดาวเทียมเพื่อให้ได้ค่าพิกัดของตำแหน่งสามารถคำนวณได้จากสัญญาณรหัสดิจิทัล (Digit code) และสัญญาณแบบเฟส (Phase) ซึ่งดาวเทียมในระบบต่างๆของ GNSS ก็จะมีคลื่นความถี่ของสัญญาณแตกต่างกันแต่มี

หลักการคล้ายคลึงกัน ในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงเพียงสมการพื้นฐานแบบเฟสที่เป็นที่คุ้นเคยของสัญญาณจีพีเอสดังต่อไปนี้

2.1 สมการความแตกต่างเฟสของคลื่นส่ง

การได้มาซึ่งค่าพิกัดบนพื้นโลกนั้นมาจากการวัดระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณบนพื้นโลกบนพื้นฐานของสมการความแตกต่างเฟสของคลื่นส่ง โดยการนับจำนวนลูกคลื่นทั้งหมดระหว่างดาวเทียมและเครื่องรับ ให้ความถูกต้องจะสูงกว่าการใช้รหัสดิจิทัลเนื่องจากความยาวคลื่นที่สั้นกว่า แต่การนับจำนวนลูกคลื่นนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากคลื่นไม่มีรูปแบบ ไม่ทราบจุดเริ่มต้นและสิ้นสุด เครื่องรับสัญญาณจะสามารถวัดได้เพียงความต่างเฟส การหาจำนวนลูกคลื่นต้องอาศัยการรับข้อมูลจำนวนมากมาประมวลผลทางสถิติแสดงได้ดังสมการที่ (1) [1,2]

$$\lambda\Phi_r^s(t_r, t_e) = \rho_r^s(t_r, t_e) - (\delta t_r - \delta t_s)c + \lambda N_r^s - \delta_{ion} + \delta_{tro} + \delta_{tide} + \delta_{mul} + \delta_{rel} + \epsilon \quad (1)$$

โดยที่ Φ_r^s คือ ระยะเวลาความแตกต่างเฟสของการจับคู่สัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียม s และสัญญาณเสมือนที่ผลิตออกมาจากเครื่องรับสัญญาณ r , λ คือ ความยาวคลื่น N_r^s คือ จำนวนลูกคลื่นเต็มลูก t_e คือ เวลาขณะคลื่นถูกส่งออกจากดาวเทียม t_r คือ เวลาขณะคลื่นมาถึงเครื่องรับ c คือ ความเร็วแสง δt_s คือ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาดาวเทียม δt_r คือ ค่าคลาดเคลื่อนนาฬิกาเครื่องรับ δ_{ion} คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ δ_{tide} คือ ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและมหาสมุทร δ_{mul} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากคลื่นหลายวิถี และ ϵ คือ ค่าคลาดเคลื่อนอื่นๆ

2.2 การรังวัดดาวเทียมแบบสัมพัทธ์

การรังวัดดาวเทียมเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่ถูกต้องแม่นยำจะต้องเป็นการกำหนดตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative positioning) ที่ใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อยสองเครื่องรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกัน โดยที่เครื่องที่หนึ่งวางไว้บนตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัด

เรียกว่าสถานีฐาน (Base station) และอีกเครื่องหนึ่งวางไว้บนตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าพิกัดเรียกว่าสถานีจร (Rover) เมื่อนำข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณทั้ง 2 มาประมวลผลร่วมกันจะได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องสูง การรังวัดแบบสัมพัทธ์โดยใช้ข้อมูลเฟสของคลื่นส่งที่นิยมใช้มีและดำเนินการในเมืองแม่เกาะ มีดังนี้ [1,3]

2.2.1 การรังวัดแบบสถิต

การรังวัดแบบสถิต (Static survey) เป็นการรังวัดแบบสัมพัทธ์ โดยทั่วไปจะรับสัญญาณ 1 – 2 ชั่วโมง อาจน้อยหรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานี จำนวนดาวเทียม และลักษณะทางเรขาคณิตดาวเทียม โดยจะต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง อย่างต่อเนื่องภายหลังจากรับสัญญาณเสร็จ ข้อมูลจะถูกประมวลผลโดยซอฟต์แวร์เฉพาะ ได้ผลออกมาเป็นพิกัดตำแหน่ง การรังวัดแบบสถิตเป็นวิธีที่ให้ความถูกต้องตำแหน่งต้องสูงที่สุด โดยทั่วไปประมาณ 0.5 – 1.0 เซนติเมตร [4] สำหรับเส้นฐานที่มีความยาวไม่ไม่เกิน 20 กิโลเมตร ในกรณีใช้ระยะเวลารับสัญญาณสั้นๆ ประมาณ 10 – 20 นาที และต้องปรับให้ความถี่ในการรับสัญญาณสูงกว่าเดิมเพื่อรับข้อมูลมากขึ้นในเวลาที่สั้นลง เราจะเรียกว่าการการรังวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Fast static survey) มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งประมาณ 1.0 – 3.0 เซนติเมตร

2.2.3 การรังวัดแบบจลนในทันที

การรังวัดแบบจลนในทันที (Real time kinematic survey หรือ RTK survey) ต้องรับสัญญาณจากดาวเทียมจำนวน 5 ดวง เป็นอย่างน้อย เครื่องรับสัญญาณที่นำมาใช้ต้องรับได้ 2 ความถี่ เหมาะกับงานที่ต้องการรังวัดจุดจำนวนมาก และต้องการค่าพิกัดทันที วิธีการนี้มีจุดเด่นที่สถานีฐานจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ประมวลผลและทำการส่งข้อมูลค่าปรับแก้ไปยังสถานีจรผ่านระบบอินเทอร์เน็ต หรือสัญญาณวิทยุ ภายในเครื่องควบคุมของสถานีจรจะบรรจุซอฟต์แวร์ในการประมวลผลค่าปรับแก้ร่วมกับข้อมูลที่รับจากดาวเทียม ทำได้ที่สุดจะได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องประมาณ 1 - 5 เซนติเมตร

2.3 ความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียม

สมการในการคำนวณระยะทางระหว่างเครื่องรับสัญญาณและดาวเทียม จะปรากฏปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากสภาพอากาศและความคลาดเคลื่อนอื่นๆ [5] ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์เต็มไปด้วยแก๊สต่างๆ เมื่อได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์จะเกิดประจุกระจายอยู่ โดยมีความหนาแน่นประจุแปรผันไปตามระดับความสูงเหนือโลก เมื่อคลื่นเดินทางประจุเหล่านี้ระยะที่คำนวณได้จะสั้นลงหากวัดด้วยเฟส แต่จะยาวขึ้นหากใช้รหัสดิจิทัล ส่วนชั้นโทรโพสเฟียร์ก็มีประจุเช่นกัน แต่เป็นกลาง มีอิทธิพลทำให้คลื่นเคลื่อนที่ช้าลงซึ่งทำให้ระยะที่ได้มากกว่าความเป็นจริง ความคลาดเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับความดัน อุณหภูมิ และความชื้น ในเส้นทางที่คลื่นเดินทางผ่าน อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของการรังวัดดาวเทียมสามารถกำจัดออกไปได้อย่างมากโดยการใช้เทคนิคการวัดแบบสัมพัทธ์ หากระหว่างสถานีฐาน และสถานีจรใกล้เคียงกัน [6] ดังนั้นหากต้องการทำงานรังวัดด้วยความละเอียดถูกต้องระยะห่างระหว่างสถานีไม่ควรเกิน 20 กิโลเมตร ซึ่งเป็นข้อจำกัดหนึ่งของเทคนิคการรังวัดแบบ RTK [7]

2.4 การหาค่าระดับความสูงโดยใช้แบบจำลองฮัยออยด์

การรังวัดด้วยดาวเทียมให้ความสูงเหนือทรงรีซึ่งเป็นความสูงที่อ้างอิงผิวทรงรี World Geodetic System 1984 หรือเขียนย่อว่า WGS84 ดังนั้นหากต้องการความสูงภูมิประเทศที่แท้จริงหรือความสูงอ้างอิงระดับทะเลปานกลาง จะต้องใช้แบบจำลองฮัยออยด์เพื่อแปลงความสูงเหนือทรงรีให้เป็นความสูงภูมิประเทศ ฮัยออยด์คือพื้นผิวระดับอ้างอิงมาตรฐานหรือผิวศักยภาพความถ่วงของโลก มีความสำคัญต่อการกำหนดค่าระดับความสูงต่ำทางภูมิประเทศ การมีแบบจำลองฮัยออยด์จะทำให้สามารถคำนวณหาความสูงของภูมิประเทศนั้นๆ ได้อย่างง่ายดาย โดยการแปลงค่าความสูงเหนือทรงรีอ้างอิงที่รังวัดจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมร่วมกับแบบจำลองฮัยออยด์

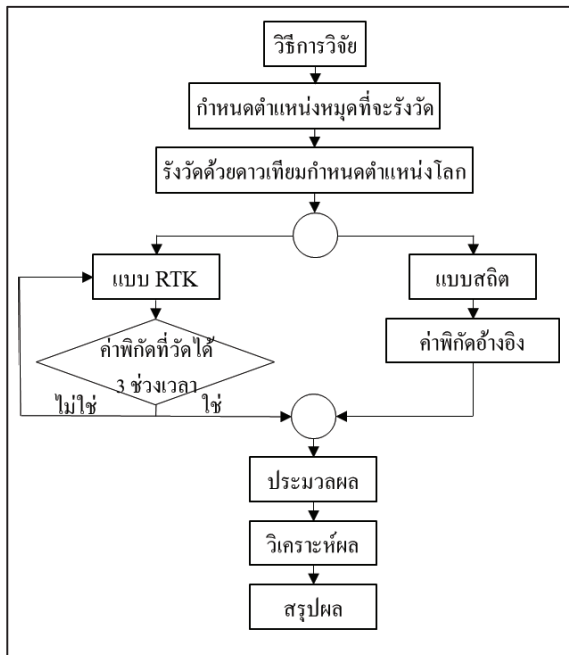
ความสัมพันธ์ร่วมระหว่างผิวโลกจริง ฮัยออยด์ และผิวทรงรีอ้างอิง สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$H_p = h_p - N_p \quad (2)$$

โดย H_p คือ ระดับความสูงภูมิประเทศ (Orthometric Height), h_p คือ ความสูงเหนือทรงรีอ้างอิงที่ได้จาก GNSS, N_p คือ ความสูงฮัยออยด์ (ความแตกต่างระหว่างฮัยออยด์ และผิวทรงรี) ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงความถูกต้องแบบจำลองฮัยออยด์ท้องถิ่นของประเทศไทยที่มีชื่อว่า THAI12H [8,9] เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าความสูงตามสมการที่ (2) ซึ่งจะให้ความถูกต้องทางดิ่งประมาณ 2 เซนติเมตรสำหรับพื้นที่บริเวณเหมืองแม่เมาะ แทนการหาความสูงด้วยวิธีการเดินระดับด้วยกล้องระดับซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องใช้เวลาดำเนินการค่อนข้างมาก

3. วิธีการวิจัย

การรังวัดแบบ RTK ต้องอาศัยการประมวลผลข้อมูลจากสถานีจรร่วมกับข้อมูลจากสถานีฐานระยะห่างระหว่างสถานีทั้งทางราบและทางดิ่งอาจมีผลต่อสัญญาณและข้อมูลที่ส่งมา ซึ่งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเกินกว่าจะยอมรับได้ จำเป็นต้องได้รับการศึกษาก่อนนำมาใช้งาน งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยมีกระบวนการในการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟังงานขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย [1]

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 [10] จำนวน 1 ตัว เป็นอุปกรณ์ที่ผู้วิจัยเลือกใช้ในงานวิจัย โดยทำหน้าที่เป็นสถานีรับสัญญาณแบบจรวดเคลื่อนย้ายตำแหน่งเพื่อทำการรังวัดบนหมุดทดสอบต่างๆ ที่กำหนดไว้ สำหรับสถานีฐานเลือกใช้ GNSS Trimble NetR9 [11] ซึ่งติดตั้งอยู่บนขอบบ่อเหมือง โดยอุปกรณ์ทั้งสองได้รับความอนุเคราะห์จากทางแผนกรังวัด การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ ดังแสดงในรูปที่ 2 และมีสมรรถนะของเครื่องมือ ดังตารางที่ 1

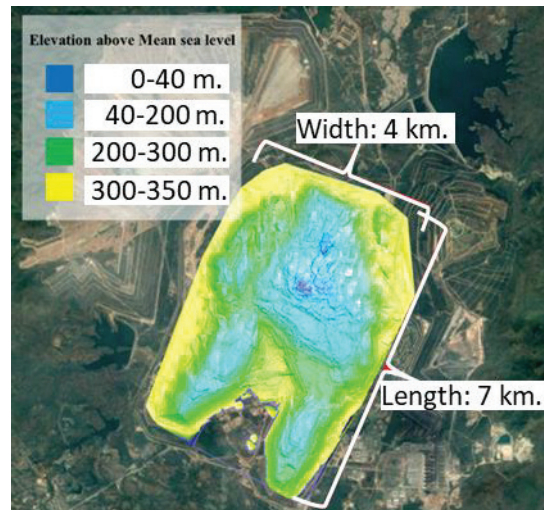


(ก) Trimble R10 (ข) Trimble NetR9

รูปที่ 2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 1 สมรรถนะของ Trimble R10 [10,11]

| ความถูกต้องของการรังวัด | R10 | NetR9 |
|-------------------------|------------------|--------------------|
| แบบสถิตทางราบ | ±3mm +0.5 ppm | ±3mm +0.1 ppm |
| แบบสถิตทางตั้ง | ±5mm +0.5 ppm | ±3.5mm +0.4 ppm |
| แบบ RTK ทางราบ | ±8mm +1 ppm | ±8mm +1 ppm |
| แบบ RTK ทางตั้ง | ±15mm +1 ppm | ±15mm +1 ppm |



รูปที่ 3 ขนาดของเหมืองแม่เมาะ [1]

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนและพิกัดตำแหน่ง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใน [1] และ [12] แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างสถานีจร และสถานีฐานมีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแปรผันตรงกับความคลาดเคลื่อน แสดงได้ดังสมการ 3

$$Error_r = a_0 + a_1(V) + a_2(H) \quad (3)$$

โดย Error คือความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ RTK เทียบกับค่าจริงจากการรังวัดด้วย

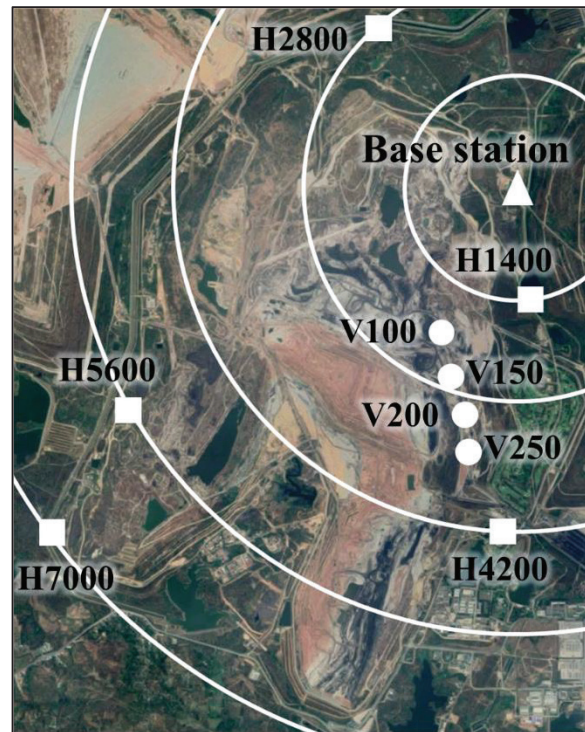
ดาวเทียมแบบสถิต, a_0 คือ พารามิเตอร์ของสมการ, a_1 คือ พารามิเตอร์หน้าตัวแปร V , a_2 คือ พารามิเตอร์หน้าตัวแปร H , V คือระยะห่างทางตั้ง หรือความต่างระดับระหว่างตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีจร, H คือระยะห่างทางราบ หรือระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีจร, t คือ ช่วงเวลาที่ทำการรับวัดเก็บข้อมูลซึ่งแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลาระหว่างวันที่ 20 ก.ย. ถึงวันที่ 22 ก.ย. พ.ศ. 2561 ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝน ช่วงที่ 2 ทำการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 17 ธ.ค. ถึงวันที่ 25 ธ.ค. พ.ศ. 2561 ซึ่งเป็นช่วงฤดูหนาว และช่วงที่ 3 ทำการเก็บข้อมูลระหว่างวันที่ 20 เม.ย. ถึงวันที่ 21 เม.ย. พ.ศ. 2562 ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อน

3.3 ตำแหน่งหมุดและการรังวัดค่าพิกัดที่ใช้งานวิจัย

ตำแหน่งหมุดที่จะรังวัด หรือหมุดทดสอบ จะต้องทำการกำหนดขึ้นโดยพิจารณาจากการทำงานรังวัดดาวเทียมแบบ RTK ซึ่งมีการใช้งานในบ่อเหมืองเป็นส่วนมาก แสดงได้ดังรูปที่ 3 ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดหมุดให้กระจายครอบคลุมพื้นที่เพื่อให้ได้ข้อมูลความสัมพันธ์และปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อความถูกต้องเชิงพิกัดอย่างครบถ้วน หมุดทดสอบถูกแบ่งเป็น 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4 คือ ชุดหมุดทางราบมีจำนวน 5 หมุด วางบนตำแหน่งที่มีระยะห่างทางราบจากสถานีฐานตามที่กำหนดคือ 1.4, 2.8, 4.2, 5.6 และ 7.0 กิโลเมตรและมีค่าระดับใกล้เคียงกันมากที่สุดซึ่งส่วนใหญ่จะวางไว้บริเวณผิวดิน ส่วนชุดหมุดทางตั้งมีจำนวน 4 หมุด วางบนตำแหน่งที่มีค่าระดับตามที่กำหนด คือ 250, 200, 150 และ 100 เมตร

การกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบตามที่ได้กล่าวไปในย่อหน้าที่แล้ว เป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดสหสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างทางราบและตั้ง ในการกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบ แบบจำลองความสูงเชิงเลข และแผนการชุดเหมืองถูกนำมาใช้พิจารณาหาตำแหน่งหมุดด้วย หมุดทดสอบทางตั้งจะทำการกำหนดให้มีระยะห่างทางตั้งจากสถานีฐานประมาณ 150, 200, 250 และ 300 เมตร โดยพิจารณาดำเนินงานจากเส้นชั้นความสูง อย่างไรก็ตามเหมืองแม่เมาะมีสภาพภูมิประเทศที่มีความสูงต่ำค่อนข้างมากและ

ยากต่อการเดินทางเข้าถึงตำแหน่งที่ตั้งของหมุดทดสอบ จึงใช้ระยะเวลาค่อนข้างมากในการเดินทางไปยังหมุดทดสอบเหล่านี้



รูปที่ 4 ตำแหน่งหมุดทางราบ (สี่เหลี่ยม) และทางตั้ง (วงกลม)

เนื่องจากมีกิจกรรมต่างๆ ในเหมืองเกิดขึ้นตลอดเวลา อาจทำให้หมุดทดสอบได้รับการรบกวน จึงจำเป็นต้องเลือกตำแหน่งที่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางภูมิประเทศตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ซึ่งต้องอาศัยแผนการทำเหมืองประกอบการตัดสินใจ ตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้จะสามารถถอดค่าพิกัดออกมาได้โดยใช้โปรแกรมด้านการสำรวจเป็นพิกัดคร่าวๆ การนำไปกำหนดตำแหน่งบนพื้นที่จริงทำได้โดยใช้ฟังก์ชันนำวิถีภายในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อวางหมุดทดสอบ

การรังวัดดาวเทียมจะทำบนหมุดทดสอบทุกหมุด กำหนดให้ค่ามาตรฐานสำหรับใช้ประเมินความถูกต้องได้มาจากการรังวัดแบบสถิตซึ่งทำการรับสัญญาณอย่างน้อย 45 นาที และนำข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณ และสถานีถาวร มาประมวลผลร่วมกันโดยใช้โปรแกรม

ประมวลผล Trimble Business Center (TBC) [13] หลังจากนั้นทำการรังวัดแบบ RTK โดยรับสัญญาณประมาณ 5 นาที รังวัดหมุดละ 10 ครั้ง และจะทำการรังวัด 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงฤดูฝน ช่วงฤดูหนาว และช่วงฤดูร้อน นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดอุณหภูมิด้วยเพื่อศึกษาผลกระทบจากสภาพอากาศและอุณหภูมิขณะทำการรังวัด

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

หลังจากทำการรังวัดเก็บข้อมูลภาคสนามเสร็จสิ้นค่าพิกัดของหมุดทดสอบแต่ละหมุดที่ได้จากการรังวัดแบบ RTK ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการรังวัดแบบสถิตผลที่ได้คือค่าความแตกต่างพิกัด โดยถือว่าค่าความแตกต่างนี้คือค่าความคลาดเคลื่อนพิกัดทางราบและทางตั้ง และทำการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 และ 3 โดยที่ผลการคำนวณในช่วงที่ 1 และ 2 อ้างอิงจาก [1]

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพิกัดทางราบ

| หมุดทดสอบ | ระยะห่างทางราบ (ม.) | ความคลาดเคลื่อน (ซม.) | | | | | | | | |
|-----------|---------------------|-----------------------|-----|------|---------------------|-----|------|---------------------|-----|------|
| | | ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) | | | ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว) | | | ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) | | |
| | | E | N | Elev | E | N | Elev | E | N | Elev |
| H1400 | 1447.472 | 2.4 | 0.3 | 0.6 | 0.7 | 1.5 | 1.3 | 1.5 | 0.5 | 0.5 |
| H2800 | 2832.324 | 0.5 | 0.7 | 1.7 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 3.5 | 1.2 | 0.5 |
| H4200 | 4198.578 | 2.6 | 1.5 | 3.4 | 3.0 | 2.6 | 1.4 | 0.8 | 2.2 | 0.8 |
| H5600 | 5599.208 | 4.2 | 1.2 | 4.2 | 3.3 | 2.9 | 2.2 | 2.8 | 3.9 | 4.2 |
| H7000 | 7021.518 | 4.3 | 0.6 | 2.2 | 1.4 | 0.9 | 1.5 | 0.7 | 0.3 | 1.0 |

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพิกัดทางตั้ง

| หมุดทดสอบ | ระยะห่างทางตั้ง (ม.) | ความคลาดเคลื่อน (ซม.) | | | | | | | | |
|-----------|----------------------|-----------------------|-----|------|---------------------|-----|------|---------------------|-----|------|
| | | ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) | | | ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว) | | | ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) | | |
| | | E | N | Elev | E | N | Elev | E | N | Elev |
| V250 | 90.206 | 1.3 | 3.4 | 2.8 | 0.6 | 3.5 | 0.7 | 1.1 | 3.0 | 1.2 |
| V200 | 139.211 | 0.9 | 2.3 | 6.3 | 1.2 | 1.5 | 5.1 | 0.8 | 0.2 | 6.4 |
| V150 | 190.798 | 1.2 | 1.5 | 4.9 | 3.1 | 2.7 | 0.7 | 4.1 | 4.6 | 0.7 |
| V100 | 236.307 | 1.5 | 2.0 | 4.3 | 1.9 | 0.4 | 1.7 | 1.1 | 2.6 | 2.3 |

เมื่อนำทั้ง 3 ช่วงเวลา มาประมวลผลร่วมกัน พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดทางราบเฉลี่ย 1.9 ซม. ทางตั้งเฉลี่ย 2.4 ซม. ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square หรือ RMS) ของพิกัดทางราบเท่ากับ 2.3 ซม. และทางตั้ง 3.1 ซม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation

หรือ SD) ของหมุดพิกัดทางราบคือ 1.3 ซม. และทางตั้ง 2.0 ซม. ดังแสดงในตารางที่ 4

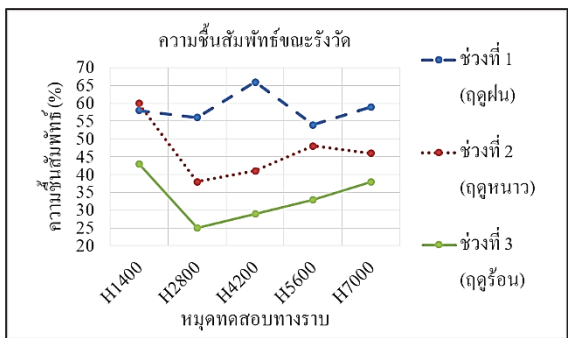
ตารางที่ 4 ผลการคำนวณเปรียบเทียบค่าพิกัดหมุดทดสอบ

| การประมวลผลหมุดทดสอบ (หมุดทดสอบทางราบ และทางตั้ง) | | ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย | |
|---|---------------------|-----------------------|-----------------|
| | | ทางราบ (N,E) | ทางตั้ง (Elev.) |
| ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ซม.) | ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) | 1.8 | 3.4 |
| | ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว) | 1.8 | 1.7 |
| | ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) | 2.0 | 2.0 |
| | ทั้ง 3 ช่วง | 1.9 | 2.4 |
| ค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) (ซม.) | ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) | 2.2 | 3.9 |
| | ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว) | 2.1 | 2.3 |
| | ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) | 2.5 | 2.8 |
| | ทั้ง 3 ช่วง | 2.3 | 3.1 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) (ซม.) | ช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) | 1.3 | 1.9 |
| | ช่วงที่ 2 (ฤดูหนาว) | 1.1 | 1.6 |
| | ช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) | 1.5 | 2.0 |
| | ทั้ง 3 ช่วง | 1.3 | 2.0 |

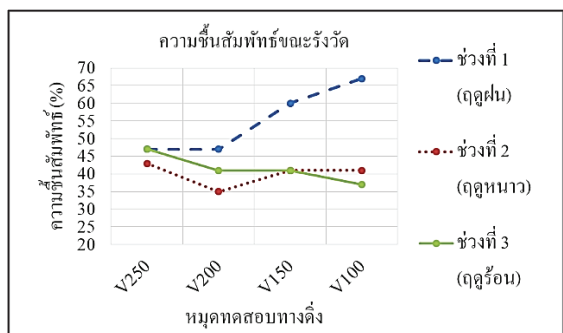
เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงเวลา พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยพิกัดทางราบของทั้ง 3 ฤดูค่อนข้างใกล้เคียงกัน ที่น่าสนใจคือค่าพิกัดทางตั้งซึ่งพบว่าช่วงฤดูฝน มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากที่สุด (3.4 ซม.) รองมาเป็นฤดูร้อน (2.0 ซม.) และฤดูหนาวมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด (1.7 ซม.) ซึ่งให้เห็นถึงความเป็นไปได้ว่าสภาพอากาศส่งผลต่อการรังวัดดาวเทียมแบบ RTK เนื่องจากสัญญาณจากดาวเทียมต้องเดินทางผ่านสภาพอากาศที่มีปริมาณความชื้นแตกต่างกันไปตามฤดู จึงได้นำข้อมูลการตรวจวัดสภาพอากาศบริเวณใกล้เคียงกับบ่อเหมืองแม่เมาะ [14] มาทำการเปรียบเทียบค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงเวลาที่ทำการรังวัดแบบ RTK แต่ละหมุดทดสอบ ทั้ง 3 ช่วง โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 และ 6 ซึ่งพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดบนหมุดทางตั้งในฤดูฝน มากกว่าฤดูร้อน และน้อยที่สุดในฤดูหนาวเกือบทุกหมุดทดสอบ

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเหมืองแม่เมาะมีสภาพอากาศเฉพาะถิ่นที่เกิดจากไอน้ำที่ปล่อยจากปล่องโรงไฟฟ้าทำให้มีโอกาสที่ฝนจะตกได้ในพื้นที่บางส่วนของเหมืองแม่เมาะ

ในระหว่างวัน ตลอดทั้งปี จึงทำให้ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณ ตำแหน่งที่ตั้งของหมุดทดสอบแต่ละหมุด อาจจะมี ความแตกต่างกัน นอกจากนั้นแล้ว ถึงแม้ว่าจะเป็นพื้นที่เดียวกัน แต่รับสัญญาณดาวเทียมในช่วงเวลาต่างกัน ความชื้นสัมพัทธ์ก็อาจจะแตกต่างกันได้



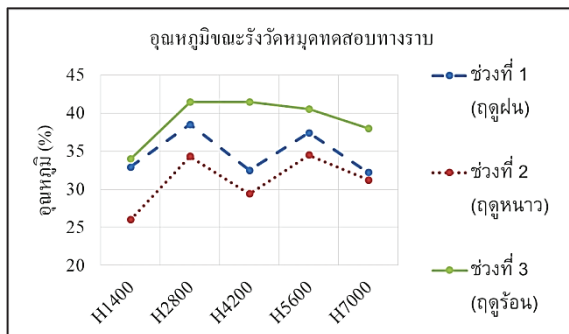
รูปที่ 5 ความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดบนหมุดทางราบ



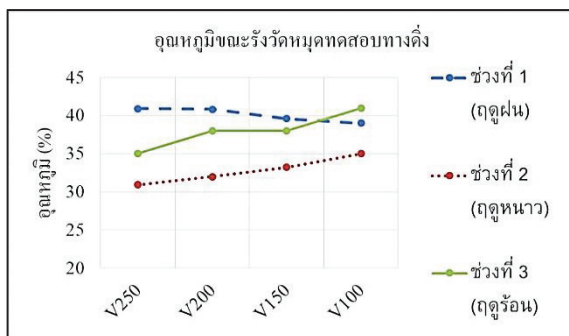
รูปที่ 6 ความชื้นสัมพัทธ์ขณะรังวัดบนหมุดทางตั้ง

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation หรือ SD) ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่าช่วงฤดูร้อนค่าที่รังวัดได้จะแกว่งมากกว่าช่วงอื่นเล็กน้อย รองลงมาเป็นฤดูฝน และฤดูหนาวมีค่าที่น้อยที่สุด เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิในขณะรังวัดแต่ละหมุดของทั้ง 3 ฤดู มาพิจารณาประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิขณะทำการรังวัดของฤดูร้อนและฤดูฝน แตกต่างกันอย่างเล็กน้อย โดยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาทำการรังวัด แม้ว่าจะเป็นฤดูหนาวแต่อุณหภูมิภายในบ่อเหมือนที่แม่เหาะสามารถมีค่าที่สูงได้ อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ เช่น ลม และก้อนเมฆ อย่างไรก็ตามในภาพรวมนั้นการรังวัดในฤดูร้อนหลายช่วงเวลามีอุณหภูมิสูงเป็นส่วนมาก (34 – 42 องศา

เซลเซียส) ซึ่งตามทฤษฎีแล้วอุณหภูมิของบรรยากาศสามารถส่งผลต่อสัญญาณที่ส่งมา [15] รวมถึงแสงแดดที่ ร้อนแรงอาจจะทำให้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ แสงอาทิตย์บางช่วงคลื่นสอดแทรกเข้าไปกับคลื่นสัญญาณ ดาวเทียมภายในเครื่องรับสัญญาณ [16] ได้ มีผลทำให้ พิกัดที่ได้มีความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 อุณหภูมิขณะรังวัดบริเวณพื้นที่ใกล้ตำแหน่ง (ก) หมุดทดสอบทางราบและ (ข) หมุดทดสอบทางตั้ง

การพิจารณาความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนทาง พิกัดตำแหน่งกับระยะห่างและระดับความสูงต่างระหว่าง สถานีจรและสถานีถาวร ในงานวิจัยนี้จะทำได้โดยการ วิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple linear regression analysis) [17] เบื้องต้น และเนื่องจากหมุด ทดสอบทางตั้งไม่สามารถควบคุมให้ระยะห่างทางราบ เท่ากันเนื่องจากสภาพภูมิประเทศภายในบ่อเหมือนแม่เหาะ ที่ความลาดชันมากและเป็นอุปสรรคอย่างมากต่อการเข้าถึง พื้นที่ (ดูรูปที่ 4 ประกอบ) เพื่อจัดสหสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรให้น้อยลง จึงได้วิเคราะห์ข้อมูลหมุดทดสอบ

ทางราบและหมุดทดสอบทางดิ่งร่วมกัน โดยแบ่งความคลาดเคลื่อนเป็นทางราบ (E และ N) และทางดิ่ง (Elev.) มาทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามฤดูกาล

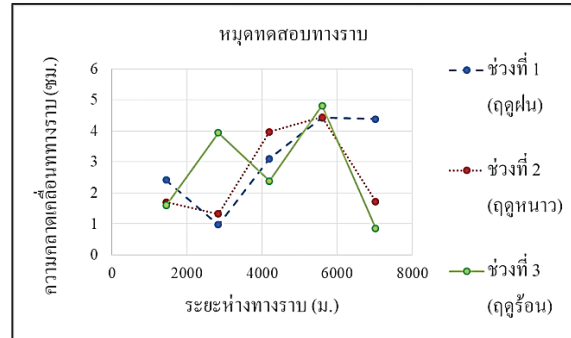
การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ จะใช้ลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดังสมการที่ (3) ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นตัวเลขสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination หรือ R^2) แสดงได้ดังตารางที่ 5 ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ ตัวแปรฝั่งซ้ายของสมการหรือตัวแปรตาม คือค่าความคลาดเคลื่อน (Error) บนหมุดทดสอบ ส่วนตัวแปรฝั่งขวาของสมการหรือตัวแปรอิสระ คือระยะห่างทางดิ่ง (V) มีหน่วยเป็นเมตร ระยะห่างทางราบ (H) มีหน่วยเป็นเมตร และ a_0 มีหน่วยเป็นเซนติเมตร การจะสรุปว่าสมการหรือก็คือแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้มา มีความน่าเชื่อถือแค่ไหนสามารถพิจารณาได้จากค่า R^2 ที่มีขนาดใหญ่เข้าใกล้ 1 มากที่สุด

ตารางที่ 5 แบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอย

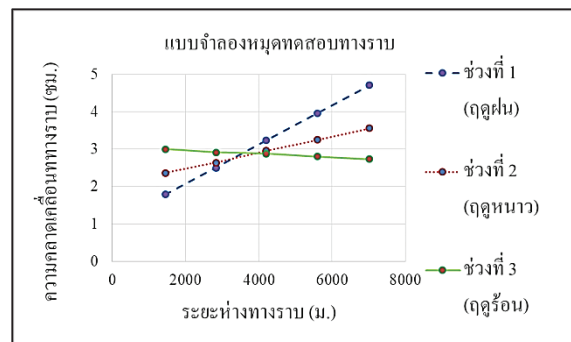
| Error | ฤดู | a_0 (ซม.) | $a_1(x10^{-3})$ (V) | $a_2(x10^{-3})$ (H) | R^2 |
|-----------|--------------|-------------|---------------------|---------------------|-------|
| E,N | ฝน,หนาว,ร้อน | 2.00 | 289.00 | 23.24 | 0.13 |
| | ฝน | 1.00 | 163.20 | 52.51 | 0.59 |
| | หนาว | 2.00 | 289.70 | 21.66 | 0.08 |
| | ร้อน | 3.00 | 414.10 | -4.46 | 0.05 |
| Elev(ซม.) | ฝน,หนาว,ร้อน | 1.00 | 958.50 | 28.10 | 0.23 |
| | ฝน | 1.00 | 0.00 | 42.35 | 0.53 |
| | หนาว | 1.00 | 368.80 | 11.83 | 0.05 |
| | ร้อน | 0.00 | 849.80 | 31.85 | 0.11 |

จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ พบว่าสมการความสัมพันธ์ของระยะห่างทั้งทางราบและทางดิ่งกับความคลาดเคลื่อนทางราบและทางดิ่ง มีค่า R^2 ที่ใกล้เคียงกัน หากมีค่ามาก แสดงถึงตัวแปรอิสระ (ระยะห่างทางราบ และดิ่ง) มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม (Error ในสมการ (3)) จากตารางที่ 5 พบว่า R^2 ในฤดูหนาวและร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่ R^2 ในฤดูฝนค่อนข้างจะต่างออกไปมาก (R^2 เท่ากับ 0.5 โดยประมาณ) เพื่อให้เกิดความเข้าใจยิ่งขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างกราฟ

ความสัมพันธ์มาเทียบกับผลการวิเคราะห์ โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ ได้ดังรูปที่ 8 และ 9



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางราบกับระยะห่างทางราบ (ข) เส้นแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนทางราบจากแบบจำลอง

รูปที่ 8 (ก) แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพิกัดของหมุดทางราบ ซึ่งหมุดทดสอบทางราบมีการควบคุมให้ค่าระดับใกล้เคียงกัน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงมีนัยยะว่าน่าจะมาจากระยะห่างทางราบ พิจารณาจากกราฟทั้ง 3 ช่วง พบว่าความคลาดเคลื่อนทางราบ (E,N) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางราบจากสถานีฐานที่มากขึ้น

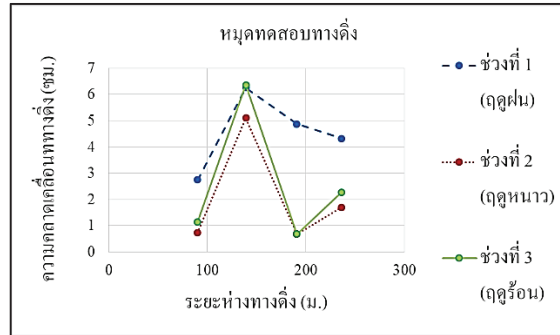
รูปที่ 8 (ข) ได้จากการแทนค่าตัวแปรอิสระลงในสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณในตารางที่ 5 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางราบอยู่ในช่วง 1-5 ซม. มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางราบจากสถานีฐานที่มากขึ้นสอดคล้องกับข้อมูลการรังวัดภาคสนามในรูปที่ 8 (ก)

โดยข้อสังเกตที่พบคือ เส้นกราฟช่วงที่ 1 (ฤดูฝน) และ 2 (ฤดูหนาว) ก่อนข้างมีลักษณะของแนวโน้มใกล้เคียงกับเป็นเส้นตรง ในขณะที่เส้นกราฟช่วงที่ 3 (ฤดูร้อน) เส้นกราฟมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรงเท่าใดนัก อาจเป็นผลมาจากผลกระทบของอุณหภูมิที่ร้อนจัดทำให้พิกัดที่ได้มีความแปรปรวนมาก (ดูรูปที่ 7(ก)) ความสัมพันธ์เชิงเส้นในสมการที่ (3) อาจจะไม่สะท้อนถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะต้องมีการศึกษาอย่างละเอียดต่อไปในอนาคต โดยจะไม่ขอกกล่าวไว้ในงานวิจัยนี้

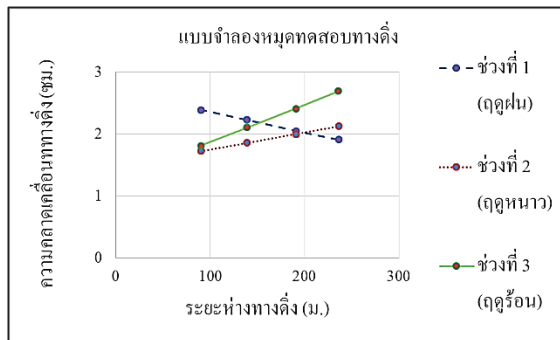
นอกจากนั้นแล้ว ลักษณะของเส้นกราฟทั้ง 3 ช่วงเวลาแสดงให้เห็นว่ายิ่งความชื้นในอากาศสูง เช่น ช่วงที่ 1 และ 2 ลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงที่มีความชันมากขึ้นสะท้อนถึงความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นนอกเหนือจากระยะทางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในการรังวัดดาวเทียมหากสถานีฐานห่างจากสถานีจรมากมีผลทำให้สภาพอากาศเหนือพื้นที่นั้นแตกต่างกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีความชื้นในบริเวณสถานีหนึ่งมากเป็นพิเศษ ก็ยิ่งทำให้เกิดความแตกต่างทางสภาพอากาศมากขึ้น ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนมากตามไปด้วย อาจเพราะเหตุนี้เมื่อนำไปวิเคราะห์ถดถอยจึงให้ค่า R^2 มีขนาดใหญ่ในช่วงฤดูฝน (ดูตารางที่ 5)

รูปที่ 9 (ก) แสดงความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งของหมุดทดสอบทางดิ่ง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในการกำหนดหมุดทดสอบทางดิ่งนี้ไม่สามารถควบคุมให้มีระยะห่างทางราบเท่ากันได้ด้วยข้อจำกัดทางภูมิประเทศของบ่อเหมืองแม่เมาะ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจึงอาจจะมาจากทั้งระยะห่างทางราบและทางดิ่ง พิจารณาจากกราฟทั้ง 3 ช่วงเวลา พบว่าความคลาดเคลื่อนทางพิกัดทางราบและทางดิ่ง มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางดิ่งจากสถานีฐานที่มากขึ้น ระยะห่างทางดิ่งจากสถานีฐานที่มากขึ้นส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนทางระดับ Elev. มีมากที่สุด อย่างไรก็ตามที่หมุดทดสอบทางดิ่ง V200 ซึ่งมีค่าระดับ 139.211 ม. มีตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้กับผนังบ่อเหมือง (ดูรูปที่ 4 ประกอบ) ซึ่งบ่อทั้งสัญญาณดาวเทียมทางฝั่งตะวันออกของเครื่องรับสัญญาณทำให้จำนวนดาวเทียมที่เครื่องสัญญาณรับได้จะน้อยกว่าหมุดทดสอบทางดิ่งที่

ตำแหน่งอื่นๆ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเฉลี่ยมีขนาดโตประมาณ 5 – 6 ซม.



(ก)



(ข)

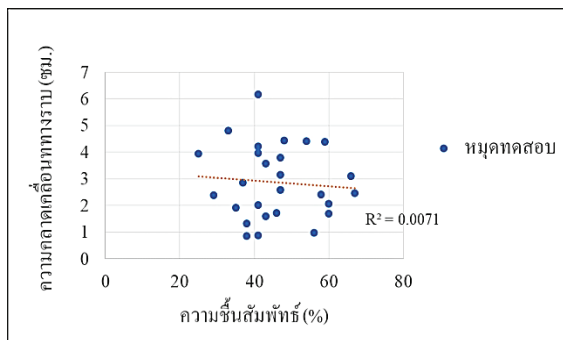
รูปที่ 9 (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งกับระยะห่างทางดิ่ง (ข) เส้นแนวโน้มของความคลาดเคลื่อนทางดิ่งจากแบบจำลอง

รูปที่ 9 (ข) ได้จากการแทนค่าตัวแปรอิสระลงในสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงพหุคูณในตารางที่ 5 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางดิ่งอยู่ในช่วง 1-3 ซม. อย่างไรก็ตามหากไม่นำค่าความคลาดเคลื่อนทางดิ่งเฉลี่ยที่หมุดทดสอบ V200 มาพิจารณา จะทำให้ความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง (Elev.) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างทางดิ่งจากสถานีฐานที่มากขึ้น (ไม่ได้แสดงรูปในบทความวิจัยนี้)

ข้อสังเกตที่พบคือ ช่วงที่ 2 และ 3 ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน สอดคล้องกับความชันสัมพัทธ์ขณะรังวัดหมุดทดสอบทางดิ่ง (แสดงดังรูปที่ 6) เป็นไปได้ว่าความชื้นมีผลต่อความคลาดเคลื่อนทางดิ่ง

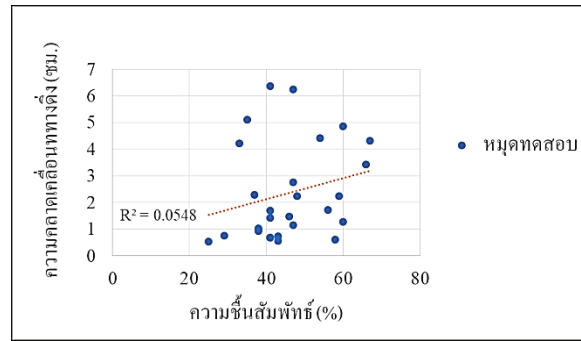
จากที่กล่าวมาข้างต้นระยะห่างทางราบและทางดิ่ง เมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่าส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน อย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์แล้วกลับได้ ค่า R^2 ที่น้อยเกินกว่าจะใช้ในการทำนายความคลาดเคลื่อน ได้ และสำหรับข้อสังเกตทั้งในเรื่องของอุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ที่อาจมีความเกี่ยวข้องกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้น เมื่อได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ แสดงได้ดังรูปที่ 10 และ 11 ปรากฏว่าไม่พบแนวโน้มที่ ชัดเจนว่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์จะมีความสัมพันธ์ ต่อความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นทางราบหรือ ทางดิ่ง

อย่างไรก็ตามผลที่ได้ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงผลวิจัย ในเบื้องต้นเท่านั้น และจำกัดเฉพาะการเก็บข้อมูลใน สภาพแวดล้อมการทำงานของเหมืองแม่เมาะซึ่งแตกต่าง จากสถานที่อื่น อีกทั้งสภาพภูมิประเทศของเหมืองแม่เมาะ มีส่วนสำคัญที่ทำให้การวางแผนกำหนดจุดทดสอบทำได้ ยาก จำนวนหมุดทดสอบค่อนข้างน้อยส่งผลให้การ วิเคราะห์มีประสิทธิภาพไม่ดีเท่าที่คาดหวังไว้



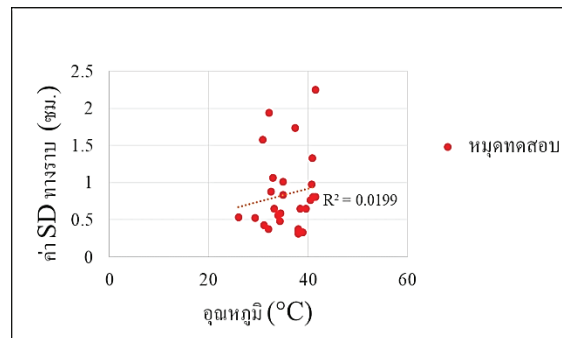
(ก)

รูปที่ 10 (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนทางราบ กับความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ความสัมพันธ์ของความ คลาดเคลื่อนทางดิ่งกับความชื้นสัมพัทธ์

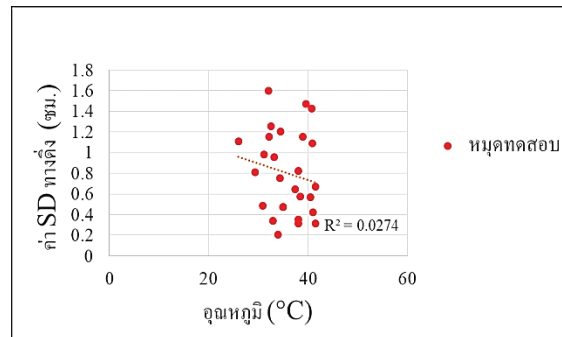


(ข)

รูปที่ 10 (ต่อ) (ก) ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อน ทางราบกับความชื้นสัมพัทธ์ (ข) ความสัมพันธ์ของความ คลาดเคลื่อนทางดิ่งกับความชื้นสัมพัทธ์



(ค)



(ง)

รูปที่ 11 (ก) ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทาง ราบกับอุณหภูมิ (ข) ความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานทางดิ่งกับอุณหภูมิ

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดตำแหน่งหมุดทดสอบให้ มีระยะห่างทางราบและทางดิ่งห่างออกจากสถานีฐานตาม ระยะที่กำหนดไว้ โดยหมุดทดสอบกระจายตัวอยู่บริเวณ บ่อเหมืองแม่เมาะ เมื่อทำการรังวัดหมุดด้วยเทคนิคการ

รับวัดแบบ RTK ทั้ง 3 ช่วงเวลา คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และ ฤดูร้อน แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่รับวัดไว้ก่อนหน้าด้วยวิธีสถิติ พบว่ามีค่าเฉลี่ยรวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในเกณฑ์การทำงานของ GNSS ในด้านการรับวัดสำรวจ ซึ่งมีขอบเขตความถูกต้องที่ 2 – 5 เซนติเมตร [18] ดังนั้นการใช้เทคนิคการรับวัดแบบ RTK ในพื้นที่เหมืองแม่เมาะจึงสามารถทำงานได้โดยจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ภายในเกณฑ์

สำหรับความชื้นในอากาศและอุณหภูมิขณะรับวัดพบว่าไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อน และค่าเบี่ยงเบนในขณะที่ทำการรับวัดแบบ RTK อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนที่เป็นผลมาจากระยะห่างทางราบ และระยะห่างทางตั้ง เมื่อทำการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงพหุคูณ ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ หรือแบบจำลอง เมื่อนำไปแทนค่าข้อมูลรับวัด และสร้างกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง พบว่าพิกัดทางราบมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 1 - 5 ซม. สำหรับพิกัดทางตั้งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางตั้งอยู่ในช่วง 1 - 3 ซม. มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างจากสถานีฐานที่มากขึ้น สอดคล้องกับข้อมูลการรับวัดภาคสนาม อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะได้รับผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองขี้ออคด์ที่ท้องถิ่นบริเวณเหมืองแม่เมาะ

การใช้งานช่วงเวลาก่อนและหลังฝนตกพบว่าบนท้องฟ้าจะมีเมฆหนาแน่นซึ่งอาจทำให้ประสบปัญหาในการรับสัญญาณ และอาจใช้เวลาในการ initialize ก่อนใช้งาน การรับวัดแบบ RTK เพียงครั้งเดียวอาจไม่ได้ค่าพิกัดที่ดีที่สุด ผู้ปฏิบัติงานควรทำการรับวัดซ้ำ ซึ่งต้องพิจารณาความเหมาะสมของลักษณะงาน หากเป็นงานในการออกหมุดอ้างอิงควรใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อให้ค่าพิกัดมี

ความถูกต้องมากที่สุด หากเป็นงานสำรวจภูมิประเทศซึ่งไม่ต้องการความถูกต้องสูงอาจสามารถใช้การรับวัดเพียงครั้งเดียวได้ ตำแหน่งในการรับวัดเพื่อออกหมุดอ้างอิงควรจะเป็นพื้นที่เปิดโล่ง แม้ว่าการรับวัดในจุดที่ไม่ห่างจากสถานีฐานมากจะให้ค่าพิกัดที่ดี แต่หากสัญญาณถูกบดบังจนไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมในตำแหน่งทางเรขาคณิตที่ดีได้ คุณภาพของค่าพิกัดที่รับวัดก็จะลดลง นอกจากนั้นในกรณีที่ต้องการรับวัดแบบ RTK แต่จุดที่จะฝังหมุดอยู่ไกลจากสถานีฐานมาก และต้องการให้มีความคลาดเคลื่อนต่ำก็ควรพิจารณาใช้วิธีสถิติแทนจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า

สำหรับแบบจำลองความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีค่า r^2 ที่น้อยเกินกว่าจะใช้ในการทำงานความคลาดเคลื่อนได้ เพราะหมุดที่นำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์มีจำนวนน้อย เนื่องจากข้อจำกัดทางภูมิประเทศของบ่อเหมืองแม่เมาะจึงทำให้แบบจำลองที่คำนวณได้จากผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ แสดงความผันแปรของความคลาดเคลื่อนกับระยะห่างทางราบและทางตั้งระหว่างสถานีฐานและสถานีจรได้ไม่ดีเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามหากมีการใช้จำนวนหมุดทดสอบที่มากขึ้นและการพิจารณาปัจจัยอื่นๆ อาจสามารถปรับปรุงแบบจำลองให้มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้นได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณการสนับสนุนจาก โครงการความร่วมมือทางการศึกษา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (โครงการ กฟผ.-มช.) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และให้คำปรึกษาในการวิจัยงานวิจัยสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ธเนศพล บุญประกอบ และ พุทธิพล คำรงค์ชัย. ผลกระทบของความยาวเส้นฐานต่อความถูกต้องของการสำรวจ รับวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในพื้นที่บริเวณเหมืองถ่านหินเปิดแม่เมาะ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, 10-12 กรกฎาคม, อุตรธานี, 2562; 2509-2515.

- [2] Guochang, X. GPS: Theory, Algorithms and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [3] เฉลิมชนม์ สติระพจน์. การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสเบื้องต้น. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [4] บุญฤทธิ์ เขียวอร่าม และ พุทธิพล คำรงค์ชัย. การประเมินความถูกต้องของวิธีการรังวัดเพื่อหาปริมาตรงานขุดหน้าดินและถ่านหินในเหมืองเปิดขนาดใหญ่. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2562; 26(1): 59-79.
- [5] Lau, L. Investigation into the Effect of Atmospheric Particulate Matter (PM2.5 and PM10) Concentrations on GPS Signals. *sensors*, 2017; 17(3): 508/1-508/17.
- [6] Janssen, V. and Haasdyk J. Assessment of Network RTK performance using CORSnet-NSW. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNS Symposium 2011, November, Sydney, Australia, 2011.
- [7] Zhang, K., Wu, F., Wu, S., Rizos, C., Roberts, C., Ge, L., Yan, T., Gordini, C., Kealy, A., Hale, M., Ramm, P., Asmussen, H., Kinlyside, D. and Harcombe, P. Sparse or Dense: Challenges of Australian Network RTK. International Global Navigation Satellite Systems Society IGNS Symposium, July, Queensland, Australia, 2006.
- [8] พุทธิพล คำรงค์ชัย และศุภฤกษ์ ชัยชนะ. การวัดความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดิน บริเวณประเทศไทย. *วิศวกรรมสาร มก.*, 2555; 82: 47-59.
- [9] Dumrongchai, P., Wichienchareon, C. and Promtong, C. Local Geoid Modeling for Thailand. *International Journal of Geoinformatics*, 2012; 8(4): 15-26.
- [10] Trimble Navigation Limited. Trimble R10 GNSS SYSTEM datasheet, 2013. [online] available: <http://www.trimble.com/survey/trimbler10.aspx>.
- [11] Trimble Navigation Limited. Trimble NetR9 GNSS Reference Receiver datasheet, 2013. [online] available: <https://www.trimble.com/Real-Time-Networks/Trimble-NetR9.aspx>.
- [12] Allahyari, M. Accuracy Evaluation of Real-Time GNSS Survey Observations. Master of Science's thesis, Oregon State University, USA, 2016.
- [13] Trimble Navigation Limited. Technical Notes. Trimble Business Center Office Software, 2015. [online] available: <http://www.trimble.com/survey/trimble-business-center.aspx>.
- [14] สภาพอากาศประเทศไทย. ประวัติข้อมูลสภาพอากาศ. 2561. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา: <https://th.freemeteo.com>.
- [15] Dewesoft Company. GPS Measurement and Recording-GNSS Learning Platform. 2017. [online] available: <https://dewesoft.pro/online/course/gps-measurement-and-recording-gnss>
- [16] Fernandez, E., Calero, D. and Eulalia, M. CSAC Characterization and Its Impact on GNSS Clock Augmentation Performance Guidelines. *sensors*, 2017; 17(2): 370/1-370/19.
- [17] Mikhail, E. and Ackermann, F. Observations and Least Squares. University Press of America, Washington, DC, 1976.
- [18] Zilkoski, D., D'Onofrio, J.D. and Frakes, S.J. Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoidal Heights [standard: 2 cm and 5 cm]. NOAA NOS, Silver Spring, Maryland, USA, 1997.