

การปรับแก้ค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จากสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกหลายเส้นฐาน Adjustment of Orthometric Height by Least Squares Method using GNSS Leveling Equations from Multi-baseline

ปณิธาน บำรุงราษฎร์^{1,*} ชัยพร กิจประชา² และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: blackout_team@hotmail.com

บทคัดย่อ

ความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric height) คือ ความสูงที่อ้างอิงจากระดับทะเลปานกลาง ซึ่งเป็นความสูงที่ใช้ในงานวิศวกรรมต่าง ๆ โดยในปัจจุบันได้มีการนำระบบนำทางด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS) มาประยุกต์ใช้แทนการเดินระดับแบบดั้งเดิม (Leveling) ทำให้วิธีการนี้มีความสะดวกและประหยัดทรัพยากรในการปฏิบัติงานมากขึ้น อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการใช้ระยะเส้นฐานที่เหมาะสม งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อประเมิน ประสิทธิภาพวิธีการทำระดับด้วยระบบนำทางด้วยดาวเทียม (GNSS leveling) ร่วมกับสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Stations, CORS) กรมแผนที่ทหาร ด้วยวิธีการรังวัดแบบสถิติกับแบบจำลองยออดความละเอียดสูงของประเทศไทย (Thai geoid model, TGM2017) แล้วใช้สมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกจาก 3 เส้นฐานที่มีระยะทางไกลกว่า 20 กิโลเมตร มาปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อหาค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 ที่อยู่ในพื้นที่ภูมิประเทศแบบที่ราบสูงจากนั้นเปรียบเทียบกับค่าประมาณผลแบบ 1 เส้นฐาน แล้วประเมินความถูกต้องกับค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 จากการศึกษาพบว่าในกรณีที่เส้นฐานมีระยะไกล วิธีการปรับแก้ด้วยสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริก 3 เส้นฐาน สามารถให้ค่าคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีประมาณผลแบบ 1 เส้นฐาน โดยให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.035 เมตร ซึ่งลดลงประมาณ 37%

คำสำคัญ: ค่าความสูงออร์โทเมตริก, การทำระดับด้วยระบบดาวเทียม GNSS, แบบจำลองยออด, การปรับแก้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

Abstract

Orthometric height is the height referenced from the mean sea level, which is the height used in various engineering works. Currently, Global Navigation Satellite System (GNSS) can provide the orthometric height making this method more convenient and

resource-saving in operation. However, this method still has limitations regarding the appropriate baseline distance. This research aims to evaluate the efficiency of GNSS leveling utilizing three baselines approaches with CORS along with geoid height obtained from Thai geoid model (TGM2017). In addition, GNSS-derived orthometric height obtained from single baseline is compared. The results of two mentioned approaches are then compared with the orthometric height from the first-order benchmarks. The study found that in the case of a long baseline, the method of adjustment of three baselines can provide lower error than single baseline processing with RMSE of 0.035 meters, which is a reduction of approximately 37%.

Keywords: Orthometric height, GNSS leveling, Geoid model, Least squares adjustment

1. คำนำ

การทำระดับด้วยระบบดาวเทียม GNSS สามารถคำนวณหาความสูงออร์โทเมตริกได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือพื้นผิวทรงรี (Ellipsoidal height) และความสูงยออด (Geoid undulation) ที่ได้มาจากแบบจำลองยออด (Geoid model) ทำให้วิธีนี้ประหยัดแรง เวลา และค่าใช้จ่าย มากกว่าการทำระดับแบบดั้งเดิม [1] ซึ่งจะเห็นประโยชน์ได้อย่างชัดเจนหากพื้นที่งานที่มีระยะทางรวมไกลหรืออยู่ในพื้นที่ภูเขา [2] หากแต่ปัญหาของการรังวัดด้วยดาวเทียมที่มีข้อจำกัดที่ต้องคำนึงถึงระยะเส้นฐานหรือระยะห่างระหว่างสถานีฐาน (Base station) และสถานีจร (Rover station) ที่มีผลต่อความถูกต้องของค่าพิกัดและความสูงเหนือทรงรีที่คำนวณได้ [3]

โดยในปี พ.ศ. 2560 กรมแผนที่ทหารกับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้ร่วมกันพัฒนาแบบจำลองยออดความละเอียดสูงของประเทศไทย (Thai geoid model 2017, TGM2017) [4] ที่ให้ความถูกต้องเฉลี่ยไม่เกิน 10 เซนติเมตร [5] ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาชี้ให้เห็นว่าการหาค่าความสูงออร์โท

เมตรด้วยระบบดาวเทียม GNSS โดยใช้แบบจำลองยอยอด TGM2017 ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับการทำระดับมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองยอยอดอื่น ๆ ในพื้นที่ราบลุ่ม [6,7] หรือในพื้นที่ที่ไม่มีความแตกต่างภูมิประเทศมากนัก [8]

อย่างไรก็ดี ความถูกต้องของแบบจำลองยอยอด TGM2017 นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศด้วย เนื่องจากความไม่ราบเรียบของแต่ละพื้นที่ที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกับพื้นที่แบบภูเขาหรือที่ราบสูงที่มีลักษณะเป็นเนินลูกคลื่นที่อาจส่งผลกระทบต่อความเปลี่ยนแปลงของแรงโน้มถ่วงในระยะทางสั้นได้ ทำให้ต้องอาศัยข้อมูลแรงโน้มถ่วงที่ต่อเนื่องเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำสูง [9] อันจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของแบบจำลองยอยอดที่ได้ ผู้วิจัยได้มองเห็นถึงปัญหาเหล่านี้ จึงได้มีแนวคิดที่จะนำสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกมาประยุกต์ใช้กับวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด และใช้คำนวณหาในการประมาณค่าความสูงออร์โทเมตริกเพื่อประเมินความถูกต้องในการพื้นที่ศึกษาแบบที่ราบสูงและมีระยะเส้นฐานไกล

งานวิจัยนี้จะทำการหาค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดทดสอบซึ่งเป็นหมุดระดับชั้นที่ 1 ของกรมแผนที่ทหาร จำนวน 9 หมุด ที่อยู่ในพื้นที่ภูมิประเทศแบบที่ราบสูง ด้วยวิธีการทำระดับด้วยระบบดาวเทียม GNSS โดยใช้วิธีการรังวัดดาวเทียมแบบสถิต (Static survey) เป็นเวลา 3 ชั่วโมงร่วมกับแบบจำลองยอยอด TGM2017 ซึ่งแต่ละหมุดทดสอบจะใช้สถานี CORS ของกรมแผนที่ทหาร จำนวน 3 สถานี เป็นสถานีฐานและมีระยะเส้นฐานระหว่างสถานี CORS กับหมุดทดสอบมากกว่า 20 กิโลเมตร โดยจะทำการประมวลผลข้อมูลดาวเทียมแบบ 3 เส้นฐาน และนำสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกมาประยุกต์ใช้เป็นแบบจำลองในการปรับแก้ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเพื่อประมาณค่าความสูงออร์โทเมตริกแล้วเปรียบเทียบกับค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน โดยจะประเมินความถูกต้องกับค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 ที่ได้จากการทำระดับ เพื่อศึกษาวิธีการหาค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยระบบดาวเทียม GNSS ในกรณีที่มีระยะเส้นฐานไกล ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่องานสำรวจทางดิ่งในการบริหารจัดการทรัพยากรในการปฏิบัติงานได้ดียิ่งขึ้น

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

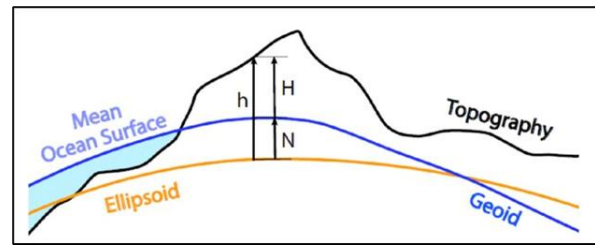
เพื่อประเมินความถูกต้องของการปรับแก้ค่าความสูงออร์โทเมตริกของจุดที่ต้องการทราบค่าด้วยสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกและความถูกต้องของการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกร่วมกับแบบจำลองยอยอดความละเอียดสูง TGM2017 ในภูมิประเทศแบบที่ราบสูง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยระบบดาวเทียม GNSS

ค่าพิกัดทางดิ่งที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมนั้นคือค่าพิกัดทางดิ่งที่อ้างอิงจากพื้นผิวทรีรี ในขณะที่มีความสูงที่ใช้กันในทางวิศวกรรมนั้นอ้างอิงจากระดับน้ำทะเลปานกลางหรือพื้นผิวยอยอด หรือที่เรียกว่า ความสูงออร์โทเมตริก ดังนั้นการจะแปลงความสูงที่อ้างอิงจากพื้นผิวทรีรีเป็นความสูงที่

อ้างอิงจากพื้นผิวยอยอดนั้นจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ดังแสดงในรูป 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นผิวทรีรีและยอยอด [10]

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าการที่จะแปลงความสูงเหนือทรีรีเป็นความสูงเหนือยอยอดหรือความสูงออร์โทเมตริกนั้นจำเป็นต้องทราบค่าต่างระหว่างพื้นผิวทั้งสองก่อน โดยความสัมพันธ์ระหว่างความสูงยอยอดกับความสูงเหนือทรีรีและความสูงออร์โทเมตริกสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$H = h - N \quad (1)$$

โดยที่ H คือ ค่าความสูงออร์โทเมตริก, h คือ ค่าความสูงเหนือทรีรี และ N คือ ค่าความสูงยอยอด หรือค่าสูงต่างระหว่างพื้นผิวยอยอดและพื้นผิวทรีรี

2.2 เทคนิคการปรับแก้แบบใช้สมการค่ารังวัด

เทคนิคการปรับแก้แบบใช้สมการค่ารังวัด หรือบางครั้งเรียกว่าวิธีสมการค่าสังเกต (Observation equation) เป็นหนึ่งในวิธีการปรับแก้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรมสำรวจ เพื่อปรับแก้ค่ารังวัดหรือพารามิเตอร์จากแบบจำลองที่เรากำหนด ให้มีค่าถูกต้องมากที่สุดที่จะเป็นไปได้ตามเกณฑ์กำลังสองน้อยที่สุด โดยจะใช้แบบจำลองที่มีค่ารังวัด ค่าคงที่ และพารามิเตอร์ โดยที่แต่ละแบบจำลองจะมีค่ารังวัดเพียงค่าเดียว ดังนั้นพารามิเตอร์ในแบบจำลองมีจำนวนเท่ากับจำนวนค่ารังวัดที่น้อยที่สุดหรือ n_0 พารามิเตอร์ จำนวนแบบจำลองมีเท่ากับจำนวนค่ารังวัดหรือ n สมการ การมีพารามิเตอร์ในแบบจำลองเป็นการเพิ่มจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในการปรับแก้ขึ้นมา จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองเท่ากับจำนวนค่ารังวัดเกินรวมกับจำนวนพารามิเตอร์ หรือ $r + n_0$ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากข้อเท็จจริงที่ว่า $r = n - n_0$ ก็จะได้ว่า $r + n_0 = n$ นี่จึงเป็นเหตุผลว่าทำไมในการปรับแก้โดยเทคนิคการปรับแก้แบบใช้สมการค่ารังวัด จะต้องมีการสร้างแบบจำลองขึ้นมาจำนวนเท่ากับจำนวนค่ารังวัด ในที่นี้ถ้ามุ่งความสนใจเฉพาะฟังก์ชันเชิงเส้น ดังนั้น เราสามารถเขียนรูปแบบมาตรฐานของแบบจำลองได้ว่า [11,12]

$$\begin{aligned} l_{a1} &= a_{11}x_{a1} + a_{12}x_{a2} + \dots + a_{1n_0}x_{a_{n_0}} + l_{01} \\ l_{a2} &= a_{21}x_{a1} + a_{22}x_{a2} + \dots + a_{2n_0}x_{a_{n_0}} + l_{02} \\ &\vdots \\ l_{an} &= a_{n1}x_{a1} + a_{n2}x_{a2} + \dots + a_{nn_0}x_{a_{n_0}} + l_{0n} \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ $l_{a1}, l_{a2}, \dots, l_{an}$ คือ ค่ารังวัดที่ปรับแก้แล้ว, $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n_0}$ คือ สัมประสิทธิ์, $x_{a1}, x_{a2}, \dots, x_{an_0}$ คือ พารามิเตอร์ และ $l_{01}, l_{02}, \dots, l_{0n}$ คือ ค่าคงที่ ถ้าให้ L_a คือ เวกเตอร์ของค่ารังวัดที่ปรับแก้แล้วขนาด $n \times 1$

$$L_a = \begin{bmatrix} l_{a1} \\ l_{a2} \\ \vdots \\ l_{an} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ให้ A คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ขนาด $n \times n_0$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n_0} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n_0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn_0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ให้ X_a คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ขนาด $n_0 \times 1$

$$X_a = \begin{bmatrix} x_{a1} \\ x_{a2} \\ \vdots \\ x_{an_0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ให้ L_0 คือ เวกเตอร์ของค่าคงที่ขนาด $n \times 1$

$$L_0 = \begin{bmatrix} l_{01} \\ l_{02} \\ \vdots \\ l_{0n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ก็สามารถเขียนสมการที่ 2 ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$L_a = AX_a + L_0 \quad (7)$$

จากสมการที่ 7 นิยมเรียกว่า สมการค่ารังวัด จะสามารถเขียนรูปทั่วไปของแบบจำลองสำหรับการปรับแก้แบบนี้ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$L_a = F(X_a) \quad (8)$$

โดยการปรับแก้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดในกรณีนี้ จะต้องมีการรวมแบบจำลองเข้ากับเกณฑ์กำลังสองน้อยที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการปรับตัวแปรให้ตรงกันโดยหากแทนค่า $L_a = L_b + v$ และให้ $L = L_0 - L_b$ โดยที่ L_b คือ ค่ารังวัด และ v คือ ค่าเศษเหลือ ลงไปในสมการที่ 7 จะได้

$$v = AX_a + L \quad (9)$$

จะเห็นว่า ในกรณีนี้แบบจำลองอยู่ในรูปแบบ v เป็นฟังก์ชันของ X_a ซึ่งสามารถนำแบบจำลองไปแทนค่าในสมการของเกณฑ์กำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งมี P คือ เมทริกซ์น้ำหนัก จากสมการ

$$\phi = v^T P v \quad (10)$$

จะได้ว่า

$$\phi = (AX_a + L)^T P (AX_a + L) \quad (11)$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\phi = X_a^T A^T P A X_a + 2L^T P A X_a + L^T P L \quad (12)$$

เมื่อตรวจสอบเมทริกซ์ทั้งหมดทางขวาของเครื่องหมายจะพบว่ามีเพียง X_a เท่านั้นที่เป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับ X_a จะได้

$$\frac{\partial \phi}{\partial X_a} = 2X_a^T A^T P A + 2L^T P A \quad (13)$$

กำหนดค่าให้เท่ากับศูนย์เพื่อหาจุดต่ำสุดจะได้

$$2X_a^T A^T P A + 2L^T P A = 0 \quad (14)$$

ย้ายข้าง แล้วตัด 2 ออกไป จากนั้นทรานสโพสทั้งสองข้างของสมการจะได้

$$A^T P A X_a = -A^T P L \quad (15)$$

การหาค่า X_a สามารถกระทำได้โดยคูณด้วย $(A^T P A)^{-1}$ ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$X_a = -(A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (16)$$

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยในการคำนวณและปรับแก้ค่าความสูงออร์โธเมตริกด้วยวิธี GNSS leveling จะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ เลือกพื้นที่ศึกษาและจัดเตรียมข้อมูล รังวัดข้อมูลในพื้นที่ศึกษา ประมวลผลข้อมูล และเปรียบเทียบและประเมินผลข้อมูล ดังมีรายละเอียดดังนี้

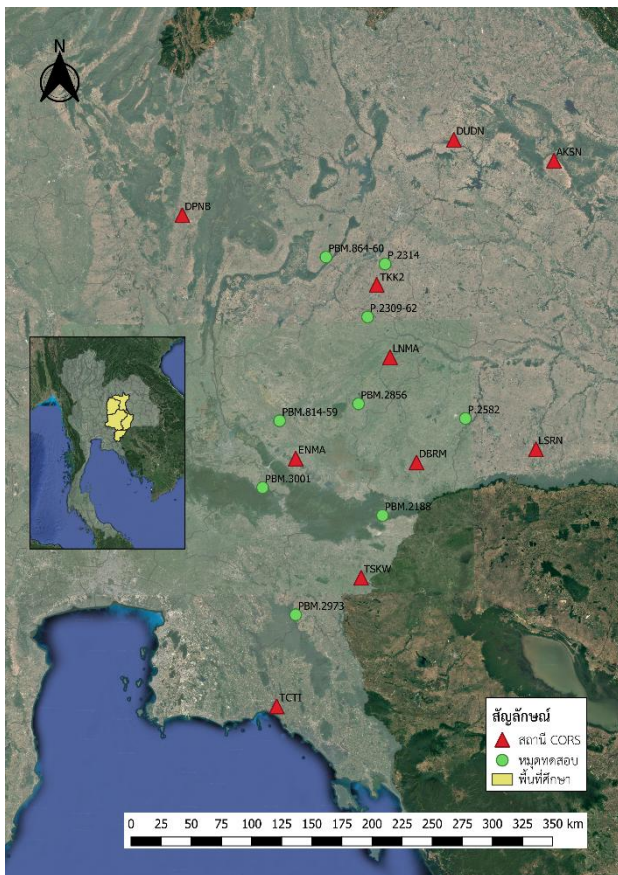
3.1 เลือกพื้นที่ศึกษาและจัดเตรียมข้อมูล

ในงานวิจัยนี้จะใช้หุ้มนระดับชั้นที่ 1 กรมแผนที่ทหาร ชนิดหุ้มนระดับถาวร (Permanent Bench Mark, PBM) จำนวน 9 หุ้มน เป็นหุ้มนทดสอบ เนื่องจากเป็นหุ้มนระดับที่มีความมั่นคงแข็งแรง เป็นหุ้มนคอนกรีตลักษณะกลม หั้วหุ้มนทองเหลืองกลมตามแบบมาตรฐานของกรมแผนที่ทหาร [13]

ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยเลือกพิจารณาพื้นที่ที่เปิดโล่ง ปราศจากสิ่งบดบังหรือ
บดบังไม่เกิน 50% ที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพที่ได้จากการรังวัดสัญญาณ GNSS
ให้ได้มากที่สุด โดยหตุระดับเหล่านี้จะอยู่ในพื้นที่ภูมิประเทศแบบที่ราบสูง
ช่วงภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนกลางถึงตอนล่างของประเทศไทย ได้แก่
จังหวัดนครราชสีมา ชัยภูมิ บุรีรัมย์ ขอนแก่น และสระแก้ว ซึ่งมีความสูง
เหนือระดับทะเลปานกลางมากกว่า 100 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยแต่
ละหตุระดับจะใช้สถานี CORS กรมแผนที่ทหาร จำนวน 3 สถานี เป็น
สถานีฐานและมีระยะเส้นฐานระหว่างสถานี CORS และหตุทดสอบ
มากกว่า 20 กิโลเมตร ดังแสดงในตารางที่ 3



รูปที่ 2 หตุระดับชั้นที่ 1 ชนิดหตุระดับถาวร กรมแผนที่ทหาร



รูปที่ 3 หตุระดับชั้นที่ 1 จำนวน 9 หตุ และ สถานี CORS จำนวน 10 สถานี

ตารางที่ 1 สถานที่ตั้งของหตุระดับชั้นที่ 1

ลำดับ	หตุทดสอบ	สถานที่ตั้ง
1	PBM.864-60	สถานีตำรวจภูธรแก่งคร้อ อ.แก่งคร้อ จ.ชัยภูมิ
2	P.2314	วัดโพธิ์ศรีโสภณ อ.บ้านไผ่ จ.ขอนแก่น
3	P.2309-62	โรงเรียนบ้านหนองผือ อ.บัวลาย จ.นครราชสีมา
4	PBM.2856	โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพ อ.จักราช จ.นครราชสีมา
5	P.2582	วัดชุมพลมณีรัตน อ.กระสัง จ.บุรีรัมย์
6	PBM.814-59	โรงเรียนบ้านบุใหญ่ อ.สูงเนิน จ.นครราชสีมา
7	PBM.3001	วัดมงคลสามัคคี อ.วังน้ำเขียว จ.นครราชสีมา
8	PBM.2188	โรงเรียนบ้านหนองเสม็ด อ.โนนดินแดง จ.บุรีรัมย์
9	PBM.2973	หน่วยป้องกันรักษาป่าที่ สก.7 อ.วังน้ำเย็น จ.สระแก้ว

ตารางที่ 2 สถานที่ตั้งของสถานี CORS

ลำดับ	หตุทดสอบ	สถานที่ตั้ง
1	DUDN	นพค.21 สนภ.2 อ.ศรีธาตุ จ.อุดรธานี
2	AKSN	องค์การบริหารส่วนตำบลนาคู อ.นาคู จ.กาฬสินธุ์
3	DPNB	นพค.16 สนภ.1 อ.เมือง จ.เพชรบูรณ์
4	TKK2	สถานีโทรคมนาคมทหารเมืองพล อ.พล จ.ขอนแก่น
5	LNMA	สนง.ที่ดินจังหวัดนครราชสีมา อ.ชุมพวง จ.นครราชสีมา
6	ENMA	ช.พัฒนา สนภ.5 อ.ปักธงชัย จ.นครราชสีมา
7	DBRM	นพค.52 สนภ.5 อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.บุรีรัมย์
8	LSRN	สนง.ที่ดินจังหวัดสุรินทร์ อ.สังขะ จ.สุรินทร์
9	TSKW	สถานีโทรคมนาคมทหารอรัญประเทศ อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว
10	TCTI	สถานีโทรคมนาคมทหารเขมะบรีจ อ.นายายอาม จ.จันทบุรี

ตารางที่ 3 ระยะเส้นฐานระหว่างสถานี CORS กับหตุระดับชั้นที่ 1

ลำดับ	สถานี CORS	หตุทดสอบ	ระยะเส้นฐาน (กม.)
1	DPNB	PBM.864-60	124.402
	LNMA		98.850
	TKK2		48.007
2	DUDN	P.2314	164.305
	LNMA		118.006
	AKSN		77.738
3	DBRM	P.2309-62	127.656
	LNMA		38.374
	TKK2		27.812
4	DBRM	PBM.2856	68.618
	ENMA		69.210
	LNMA		46.730
5	DBRM	P.2582	54.624
	LNMA		80.675
	LSRN		63.811
6	ENMA	PBM.814-59	34.987
	LNMA		107.338
	DBRM		120.523

ลำดับ	สถานี CORS	หมุดทดสอบ	ระยะเส้นฐาน (กม.)
7	ENMA	PBM.3001	36.575
	TSKW		110.984
	DBRM		129.450
8	DBRM	PBM.2188	52.267
	ENMA		86.151
	TSKW		54.793
9	ENMA	PBM.2973	129.947
	TCTI		77.813
	TSKW		62.528

3.2 รังวัดข้อมูลดาวเทียมในพื้นที่ศึกษา

การรังวัดข้อมูลดาวเทียมดำเนินการในช่วงวันที่ 10 – 19 กรกฎาคม พ.ศ. 2567 ซึ่งตรงกับฤดูฝนของประเทศไทย โดยในการรังวัดดาวเทียม GNSS เพื่อหาตำแหน่งของสถานี CORS และหมุดระดับชั้นที่ 1 จะใช้วิธีการรังวัดดาวเทียมแบบสถิต โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ยี่ห้อ CHC รุ่น i-80 ที่ให้ความถูกต้องทางราบเท่ากับ 2.5 มม. + 0.1 ppm RMSE และความถูกต้องทางดิ่งเท่ากับ 3.5 มม. + 0.4 ppm RMSE จำนวน 1 เครื่อง ติดตั้งบนหมุดระดับชั้นที่ 1 รับสัญญาณจากดาวเทียมไม่น้อยกว่า 4 ดวง บันทึกข้อมูลทุก 1 วินาที เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นดำเนินการแบบเดียวกันนี้จนครบทุกหมุดทดสอบในพื้นที่ศึกษา แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลภายหลัง



รูปที่ 4 การรังวัดดาวเทียมในพื้นที่ศึกษา

3.3 ประมวลผลข้อมูล

3.3.1 การหาค่าพิกัดของสถานี CORS

สำหรับการประมวลผลหาค่าพิกัดของสถานี CORS เพื่อนำไปใช้เป็นค่าพิกัดอ้างอิง สามารถเข้าไปดาวน์โหลดไฟล์ RINEX ของสถานี CORS ณ วันเวลาที่ทำการรังวัดดาวเทียมบนหมุดระดับชั้นที่ 1 ได้ที่เว็บไซต์ <https://cors.rtsd.mi.th/SBC/spider-business-center> จากนั้นนำไฟล์ RINEX ไปประมวลผลในซอฟต์แวร์เชิงวิจัย Bernese 5.4 โดยจะประมวลผลหาค่าพิกัดบนพื้นหลักฐานสากล 1984 (World Geodetic System 1984, WGS84) กรอบพิกัดอ้างอิงนานาชาติ 2020 (International Terrestrial Reference Frame 2020, ITRF2020) และจะใช้ค่าแก้การหมุนตัวของโลก

(Earth rotation parameters), ค่าแก้การบิดตัวของความละเอียดสูง (Precise satellite clock corrections), ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมความละเอียดสูง (Precise orbits), ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere model), ค่าแก้ความคลาดเคลื่อนของเสาอากาศเครื่องรับ (Antenna phase center variation), ค่าแก้แรงกดอากาศ (Atmospheric loading) และค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากแรงมหาสมุทร (Ocean tide loading) [14] เพื่อให้ได้ค่าพิกัดของสถานี CORS ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการประมวลผลหาค่าพิกัดของหมุดทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.3.2 การหาค่าพิกัดของหมุดระดับชั้นที่ 1

นำไฟล์ RINEX ของสถานี CORS และไฟล์ RINEX ที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมบนหมุดระดับชั้นที่ 1 ไปประมวลผลแบบเส้นฐานในโปรแกรมเชิงพาณิชย์ CGO 2.0 โดยในแต่ละหมุดทดสอบจะใช้สถานี CORS จำนวน 3 สถานี เป็นสถานีอ้างอิง ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นนำค่าพิกัดละติจูดและลองจิจูดไปใช้คำนวณหาค่า N

3.3.3 การหาค่า N

หลังจากประมวลผลเรียบร้อยแล้ว จะได้ค่าพิกัดของหมุดระดับชั้นที่ 1 ทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา จากนั้นทำการประมวลผลหาค่า N ของหมุดระดับชั้นที่ 1 ทั้งหมดด้วยโปรแกรมคำนวณค่าพิกัด Geoid Height ของแบบจำลองฮัยโดรอยด์ความละเอียดสูง TGM2017 โดยใช้ค่าพิกัดละติจูดและลองจิจูดในการคำนวณ หลังจากนั้นจะสามารถหาค่า N ที่ได้ไปใช้หาค่าความสูงออร์โธเมตริกต่อไปได้

3.3.4 การหาค่าความสูงออร์โธเมตริกของหมุดทดสอบ

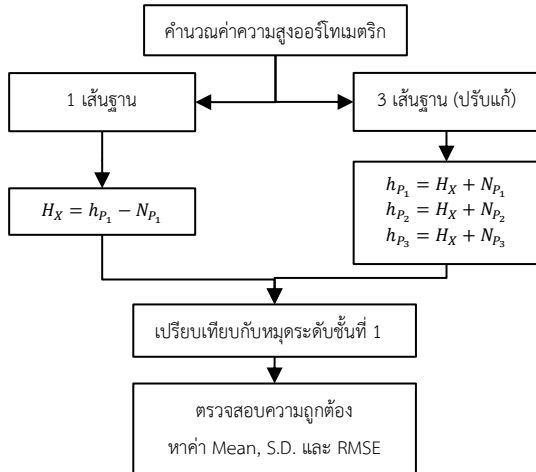
การประมวลผลด้วยโปรแกรม CGO 2.0 จะทำให้ได้ค่าความสูงเหนือทรงรีของหมุดระดับชั้นที่ 1 ทั้งหมดในพื้นที่ศึกษา สำหรับการคำนวณค่าความสูงออร์โธเมตริกจากการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน จะเลือกใช้ 1 ใน 3 เส้นฐานที่สั้นที่สุดของแต่ละกลุ่มทดสอบมาใช้ในการคำนวณและเปรียบเทียบ โดยสามารถคำนวณได้โดยตรงดังสมการที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 5

3.3.5 การปรับแก้ค่าความสูงออร์โธเมตริกของหมุดทดสอบ

แนวคิดในการเลือกจำนวนเส้นฐานเพื่อนำมาสร้างสมการคำนวณความสูงออร์โธเมตริกแล้วปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดนั้น พิจารณาจากการรังวัดเกิน (Redundant observation) คือ การรังวัดข้อมูลเกินกว่าที่จำเป็นเพื่อใช้ตรวจสอบความถูกต้องและเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่มีความน่าจะเป็นที่สุด ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถใช้ตั้งแต่ 2 เส้นฐาน แต่ในความเป็นจริงหากข้อมูลที่ได้จากทั้ง 2 เส้นฐาน มีความคลาดเคลื่อนสูงทั้งคู่จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนตามไปด้วย ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มเป็น 3 เส้นฐาน เพื่อลดความเสี่ยงดังกล่าว

ในการคำนวณปรับแก้จะนำสมการคำนวณค่าความสูงออร์โธเมตริกจาก 3 เส้นฐาน ที่ประมวลผลที่ละเส้นฐานมาใช้เป็นโมเดลในการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังนั้นเราจะสามารถสร้างโมเดลปรับแก้ได้จำนวน 3 สมการ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งจะกำหนดให้ความสูงเหนือทรงรี คือ ค่ารังวัดและให้ค่าความสูงออร์โธเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 ที่ต้องการปรับแก้

คือ พารามิเตอร์ และให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างความสูงเหนือทรงรีที่ได้จากการประมวลผลแบบเส้นฐาน คือ เมทริกซ์น้ำหนัก จากนั้นทำการคำนวณหาพารามิเตอร์ด้วยสมการที่ 16 วิธีนี้จะทำให้ได้ค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ปรับแก้แล้วเพียงค่าเดียวที่มีความน่าจะเป็นที่สุดตามเกณฑ์กำลังสองน้อยที่สุด



รูปที่ 5 แผนผังการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริก

จากรูปที่ 5 กำหนดให้ h_{p1}, h_{p2}, h_{p3} คือ ค่าความสูงเหนือทรงรีของหมุดทดสอบที่ได้จากแต่ละเส้นฐาน, N_{p1}, N_{p2}, N_{p3} คือ ค่าความสูงยอดของหมุดทดสอบที่ได้จากแต่ละเส้นฐานและ H_X คือ ค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดทดสอบที่ต้องการคำนวณ

3.4 เปรียบเทียบและประเมินผลข้อมูล

ในขั้นตอนนี้จะนำค่าความสูงออร์โทเมตริกที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 ที่ได้จากการเดินระดับดังแสดงในตารางที่ 4 เพื่อหาค่าต่างหรือค่าคลาดเคลื่อน โดยในการประเมินความถูกต้องจะใช้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean error), ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, S.D.) และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error, RMSE) ในการตรวจสอบความถูกต้องและสรุปผลต่อไป

ตารางที่ 4 ค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 ที่ได้จากการเดินระดับ

ลำดับ	หมุดทดสอบ	ค่าความสูงออร์โทเมตริก (ม.)
1	PBM.864-60	201.551
2	P.2314	167.185
3	P.2309-62	192.293
4	PBM.2856	196.198
5	P.2582	155.554
6	PBM.814-59	215.194
7	PBM.3001	469.076
8	PBM.2188	303.608
9	PBM.2973	135.533

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริก

ผลการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกจะแบ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน ที่เลือกมาจาก 1 ใน 3 เส้นฐานที่สั้นที่สุด และผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณปรับแก้โดยใช้สมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกแล้วคำนวณหาพารามิเตอร์ สามารถแสดงผลการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการคำนวณ

ลำดับ	หมุดทดสอบ	ค่าความสูงออร์โทเมตริก (ม.)	
		1 เส้นฐาน	3 เส้นฐาน (ปรับแก้)
1	PBM.864-60	201.570	201.581
2	P.2314	167.111	167.133
3	P.2309-62	192.251	192.281
4	PBM.2856	196.223	196.231
5	P.2582	155.601	155.538
6	PBM.814-59	215.265	215.242
7	PBM.3001	469.061	469.113
8	PBM.2188	303.561	303.564
9	PBM.2973	135.631	135.523

4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าความสูงออร์โทเมตริก

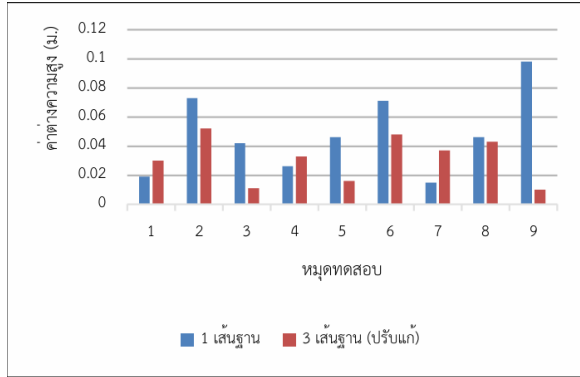
ผลการคำนวณค่าต่างความสูงออร์โทเมตริกที่ได้จากการนำผลลัพธ์จากแต่ละวิธีไปเปรียบเทียบกับค่าความสูงออร์โทเมตริกของหมุดระดับชั้นที่ 1 ที่ได้จากการเดินระดับ จากนั้นนำค่าต่างที่ได้ไปคำนวณค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย ดังแสดงผลที่ได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าต่างความสูงออร์โทเมตริกที่เปรียบเทียบกับหมุดระดับชั้นที่ 1

ลำดับ	หมุดทดสอบ	ค่าต่างความสูงออร์โทเมตริก (ม.)	
		1 เส้นฐาน	3 เส้นฐาน (ปรับแก้)
1	PBM.864-60	0.019	0.030
2	P.2314	0.073	0.052
3	P.2309-62	0.042	0.011
4	PBM.2856	0.026	0.033
5	P.2582	0.046	0.016
6	PBM.814-59	0.071	0.048
7	PBM.3001	0.015	0.037
8	PBM.2188	0.046	0.043
9	PBM.2973	0.098	0.010
Mean		0.048	0.031
S.D.		0.028	0.016
RMSE		0.055	0.035

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบค่าทางสถิติของค่าต่างความสูงออร์โทเมตริกของหมุดทดสอบ 11 หมุด จากทั้ง 2 วิธี

ค่าทางสถิติ	1 เส้นฐาน	3 เส้นฐาน	ลดลง
Mean	0.048	0.031	35.74%
S.D.	0.028	0.016	43.12%
RMSE	0.055	0.035	37.27%



รูปที่ 6 กราฟแท่งแสดงค่าต่างความสูงออร์โทเมตริกจากทั้ง 2 วิธี ที่เปรียบเทียบกันหมุดระดับชั้นที่ 1 กรมแผนที่ทหาร

5. อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

5.1 อภิปรายผลการศึกษา

การทำระดับด้วยระบบดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดดาวเทียมแบบสถิติเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง แล้วประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน จากนั้นทำการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เท่ากับ 0.048, 0.028 และ 0.055 เมตร ตามลำดับ และในส่วนของการปรับแก้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดด้วยสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกแบบสมบูรณ์จาก 3 เส้นฐาน ให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เท่ากับ 0.031, 0.016 และ 0.035 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน ให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยลดลง 35.74%, ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง 43.12% และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยลดลง 37.27% ทั้งนี้เป็นเพราะการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดด้วยการนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างความสูงเหนือทรงรีระหว่างสถานีอ้างอิงและหมุดทดสอบที่ได้จากการประมวลผลมาใช้เป็นค่าน้ำหนักสามารถลดค่าคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐานได้ กล่าวคือ ใน 3 เส้นฐาน หากมีเส้นฐานใดให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากก็จะให้ค่าน้ำหนักไปที่เส้นฐานนั้นน้อย ทำให้ค่าความสูงออร์โทเมตริกที่ปรับแก้มีค่าที่เข้าใกล้เส้นฐานที่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยเพราะมีค่าน้ำหนักมากกว่า

การทำระดับด้วยระบบดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดดาวเทียมแบบสถิติ 3 ชั่วโมง พื้นที่ภูมิประเทศแบบที่ราบสูง โดยใช้สถานี CORS กรมแผนที่ทหาร เป็นสถานีฐาน และคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกร่วมกับแบบจำลองฮัยอยด์ TGM2017 เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับหมุด

ระดับชั้นที่ 1 สามารถให้ค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ 10 เซนติเมตร แม้ว่าจะมีระยะเส้นฐานระหว่างสถานี CORS และหมุดทดสอบมากกว่า 20 กิโลเมตร และให้ค่าคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ๆ สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองฮัยอยด์ TGM2017 ยังคงใช้งานได้ดีในพื้นที่ที่ไม่ได้มีความแตกต่างกันของภูมิประเทศมาก ทั้งนี้ความแม่นยำของผลลัพธ์ก็ขึ้นอยู่กับคุณภาพข้อมูลดาวเทียมที่ส่งผลต่อความถูกต้องของความสูงเหนือทรงรีด้วยเช่นกัน

5.2 สรุปผลการศึกษา

แบบจำลองฮัยอยด์ TGM2017 ยังคงใช้คำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกได้ดีแม้ในภูมิประเทศแบบที่ราบสูง โดยวิธีการปรับแก้ค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริก 3 เส้นฐาน ให้ค่าคลาดเคลื่อนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน ที่ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เท่ากับ 0.035 ซึ่งลดลงมาประมาณ 37% ทั้งยังลดความเสี่ยงที่จะได้รับค่าคลาดเคลื่อนจากระยะเส้นฐานที่ไกลกว่า 20 กิโลเมตร เนื่องจากมีค่าน้ำหนักจากหลายเส้นฐานมาช่วยในการประมาณค่า ดังนั้นวิธีการปรับแก้ค่าความสูงออร์โทเมตริกด้วยสมการคำนวณค่าความสูงออร์โทเมตริกหลายเส้นฐานนั้นจึงเป็นทางเลือกที่สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้แทนการเดินระดับระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. ข้อเสนอแนะ

การประมวลผลแบบเส้นฐานไกลมักจะมีความจำกัดในเรื่องจำนวนดาวเทียมที่จับคู่ได้ระหว่างจุดที่ทราบค่าและจุดที่ต้องการทราบค่าอันจะส่งผลต่อความถูกต้องของค่าพิกัดที่ได้ จึงต้องมีการรับสัญญาณดาวเทียมด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม ดังนั้น ถ้าหากไม่สามารถควบคุมปัจจัยอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อความถูกต้องได้ เช่น สิ่งบดบังเครื่องรับสัญญาณที่อาจทำให้เกิดคลื่นหลายวิถีหรือรับสัญญาณดาวเทียมได้น้อยลง ฝนตกหนักมีเมฆมากระหว่างรับสัญญาณดาวเทียม และความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองฮัยอยด์ที่เลือกใช้ เป็นต้น ผู้วิจัยจึงเห็นว่า ควรหลีกเลี่ยงการประมวลผลแบบ 1 เส้นฐาน เนื่องจากไม่สามารถกระจายความเสี่ยงจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมเหล่านี้ได้

ในช่วงเวลาที่เข้าไปเก็บข้อมูลในภูมิประเทศตรงกับฤดูฝนของประเทศไทยที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของข้อมูลดาวเทียมที่ได้ ทั้งยังทำให้บางครั้งเกิดฝนตกระหว่างการรังวัดดาวเทียมจนต้องเก็บเครื่องรับสัญญาณแล้วติดตั้งใหม่เมื่อฝนหยุดตก ซึ่งทำให้สามารถรับข้อมูลดาวเทียมต่อเนื่องได้มากที่สุด 3 ชั่วโมงเท่านั้น ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงอุปสรรคดังกล่าวควรเก็บข้อมูลในช่วงฤดูกาลอื่นแทนเพื่อทำให้สามารถเพิ่มระยะเวลาการรังวัดดาวเทียมและยังป้องกันเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและอุปกรณ์อื่น ๆ ชำรุดได้อีกด้วย

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เลือกหมุดทดสอบที่เป็นหมุดระดับชั้นที่ 1 ชนิดหมุดระดับถาวรหรือหมุด PBM เพียงเท่านั้น เพราะมีความแข็งแรงทำให้ลดความเสี่ยงที่หมุดจะถูกเคลื่อนที่ ชำรุดและสูญหายได้ แต่ในการเก็บข้อมูลจริงพบว่ายังมีบางหมุดที่ชำรุดหรือสูญหายอยู่ บางหมุดมีสิ่งบดบังมากกว่า 50% ส่งผลให้หมุดที่สามารถนำมาทดสอบจริงมีจำนวนน้อย หากมี

การศึกษาเพิ่มเติมควรเพิ่มจำนวนหมุดทดสอบให้มากกว่านี้ โดยอาจนำหมุดระดับชั้นที่ 1 ชนิดหมุดระดับเสริม (Supplementary Bench Mark, SBM) ที่มีความแข็งแรง ไม่ชำรุด มาใช้ร่วมด้วยเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของค่าทางสถิติ และควรศึกษาหมุดทดสอบในพื้นที่ภูมิประเทศแบบภูเขาหรือในพื้นที่ที่มีความสูงต่างกันชัดเจนกว่านี้ เช่น ภาคเหนือบริเวณที่มีลักษณะเป็นภูเขา เพื่อที่จะสามารถศึกษาผลกระทบและประเมินความถูกต้องของแบบจำลองความละเอียดสูง TGM2017 ได้ชัดเจนมากขึ้น

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่องมือคำนวณความสูงออร์โทเมตริกด้วย TGM2017 แบบอัตโนมัติ หรือสร้างส่วนต่อประสานโปรแกรมประยุกต์ (Application program interface, API) ที่เชื่อมกับสถานี CORS ที่มีมากกว่า 300 สถานี ในประเทศไทย ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มจำนวนเส้นฐานได้มากขึ้นอันจะส่งผลต่อความแม่นยำที่มากขึ้นกว่าเดิม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมพนธ์ สติระพจน์ และอาจารย์ ดร.ชัยพร กิจประชา ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะในการปฏิบัติงาน ตลอดจนกรมแผนที่ทหารที่ได้สนับสนุนข้อมูลสำหรับใช้ในการปฏิบัติงานสำรวจทั้งในภาคที่ตั้งและภาคสนาม จนทำให้งานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] เฉลิมพนธ์ สติระพจน์. (2549). เอกสารคำสอนวิชา 2108631 Advanced GPS Satellite Surveying งานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง ((อัดสำเนา ed.). กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] KUBODERA, T., OKAZAWA, H., HOSOKAWA, Y., KAWANA, F., MATSUO, E., & MIHARA, M. (2016). Effects of surveying methods between GNSS and direct leveling on elevation values over long distance in mountainous Area. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 7(1), 62-69.
- [3] Omogunloye, O., Okorocho, C., Ojegbile, B., Odumosu, J., & Ajayi, O. G. (2017). Comparative analysis of the standard error in relative GNSS positioning for short, medium and long baselines.
- [4] ชัยวัฒน์ พรหมทอง และ พุทธิพล ดำรงชัย. (2560). การพัฒนาแบบจำลองย็อยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย. รายงาน

โครงการพัฒนาแบบจำลองย็อยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, กรมแผนที่ทหาร.

- [5] ฐิติน บัวทอง. (2021). การสร้างพื้นผิวค่าแก้สำหรับแบบจำลองย็อยด์ TGM2017 โดยใช้สถานีร่วมค่าความสูงเหนือทรงรีและความสูงออร์โทเมตริก พื้นที่ศึกษา : ปทุมธานี.
- [6] วิชโรตม์ พันโยธา. (2018). การประเมินความถูกต้องค่าระดับความสูงภูมิประเทศโดยใช้แบบจำลองย็อยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทยในพื้นที่ติดตามการทรุดตัวของพื้นดินกรุงเทพมหานครและปริมณฑล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. กรุงเทพฯ.
- [7] พงษ์ศักดิ์ จินดาศรี และ พัทธราณี จิตสุทธิ. (2020). การประเมินค่าความสูงออร์โทเมตริกจากข้อมูลแบบจำลองความสูงย็อยด์ ด้วยโครงข่ายสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 25, SGI17-SGI17.
- [8] ประกอบ มณีเนตร และคณะ. (2020). เปรียบเทียบการหาค่าระดับสูงระหว่างวิธีรังวัดโครงข่ายดาวเทียมและวิธีการระดับตามลำแม่น้ำยม จังหวัดแพร่. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, 25, SGI09-SGI09*.
- [9] Dumrongchai, P., & Duangdee, N. (2019). Evaluation of TGM2017 for height system using GNSS/Leveling data in Thailand. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 10(10), 10.144-156.
- [10] Anukwonke, C. (2017). SPACE SCIENCES AND TECHNOLOGIES IN ENVIRONMENTAL GEODESY Geodesy For Sustainable Environmental Management And National Development, Rivers State, Nigeria.
- [11] ตีบุญ เมธากุลชาติ. (2563). การคำนวณปรับแก้ในงานสำรวจ (1 ed.). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [12] ชีระ ลาภิศขยางกุล. (2549). เทคนิคปรับแก้งานสำรวจด้วยวิธีการลีสท์สแควร์ Adjustment Computation for Plane Survey Using Least Square Technique. *วารสารวิชาการ ม.อบ.*, 8(3).
- [13] กรมแผนที่ทหาร. (2560). รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการพัฒนาแบบจำลองย็อยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย.
- [14] Dach, R., Arnold D.; 2025: **Bernese GNSS Software Version 5.4**. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing.