ในด้านต่าง ๆ เช่น การทำแผนที่สามมิติ [2] งานเกษตรแม่นยำ [3] การติดตามการเปลี่ยนแปลงของชายฝั่ง [4] และการติดตามพื้นที่ทำเหมือง [5] การสำรวจด้วย UAV มีวิธีการที่ไม่ซับซ้อนเนื่องด้วยระบบควบคุมการบินสำรวจเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและการประมวลผลสามารถทำได้อัตโนมัติ ทำให้การสำรวจด้วย UAV เข้าถึงบุคคลทั่วไปในปัจจุบัน

การสำรวจด้วย UAV ที่มีความแม่นยำสูงต้องใช้อุปกรณ์ที่มีต้นทุนสูง โดยเฉพาะ UAV ที่มีระบบการกำหนดตำแหน่งแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic : RTK) และเครื่องสำรวจพิกัดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม (Global Navigation Satellite System, GNSS) แบบ 2 ความถี่ ความแม่นยำสูง ใช้สำรวจจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point, GCP) ซึ่งทำให้ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศอยู่ในระดับเซนติเมตร [6] ซึ่งชุดอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการใช้ UAV ต้นทุนต่ำสำรวจโดยไม่ใช้ GCP จึงเป็นอีกทางเลือกในการนำมาสำรวจและประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ความถูกต้องของข้อมูลเป็นสิ่งที่สำคัญในการตัดสินใจนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นการประเมินความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากการสำรวจด้วย UAV ต้นทุนต่ำโดยไม่ใช้ GCP จึงมีความจำเป็นเพื่อทราบความถูกต้องของข้อมูลที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

การประเมินความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศมีหลายงานวิจัยได้ทำไว้หลายรูปแบบเช่น การประเมินความถูกต้องจากการสำรวจด้วย UAV ที่มีระบบ RTK แบบไม่ใช้ GCP ความถูกต้องอยู่ที่ 2.0 - 2.6 เซนติเมตรในทางราบและ 3.5 - 4.7 เซนติเมตรในทางดิ่ง [7] ส่วนการสำรวจด้วย UAV ที่มีระบบ RTK ปรับแก้ด้วย GCP ให้ความถูกต้องอยู่ที่ 1.3 เซนติเมตรในทางราบและ 3.7 เซนติเมตรในทางดิ่ง [8] และการประเมินความถูกต้องของการสำรวจด้วย UAV ปรับแก้ร่วมกับ GCP ให้ความถูกต้องอยู่ที่ 4.0 - 6.0 เซนติเมตรในทางราบและ 5.0 - 6.0 เซนติเมตรในทางดิ่ง [9] จะเห็นได้ว่าความถูกต้องของการสำรวจด้วย UAV ที่มีการใช้ระบบ RTK หรือปรับแก้ด้วย GCP จะให้ความถูกต้องอยู่ในระดับ 2.0-6.0 เซนติเมตร อย่างไรก็ตามหากต้องการความถูกต้องสูงดังที่กล่าวมา ผู้สำรวจต้องมีเครื่องมือที่ใช้สำรวจที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งมีราคาที่ค่อนข้างแพง ทำให้ผู้ใช้ทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงเครื่องมือเหล่านี้ได้ การใช้ UAV ต้นทุนต่ำสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศและประมวลผลแบบอัตโนมัติ เป็นทางเลือกที่บุคคลทั่วไปนิยมใช้ทำแผนที่ ดังนั้นการประเมินความถูกต้องของการสำรวจด้วย UAV ต้นทุนต่ำที่ไม่ใช้ GCP เป็นสิ่งสำคัญที่ต้องประเมินเพื่อทราบระดับความถูกต้องเพื่อประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

การประเมินความถูกต้องการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV แบบไม่ใช้ GCP มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 34.0 - 59.8 เซนติเมตรในทางราบและ 35.0 - 69.0 เซนติเมตรในทางดิ่ง [10] และมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้นไปในระดับ 141.7 เซนติเมตร [11] จะเห็นได้ว่าการสำรวจด้วย UAV แบบไม่ใช้ GCP จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ไม่แน่นอน เนื่องจากอุปกรณ์ GNSS ที่ติดตั้งบนอุปกรณ์ UAV เป็นชนิดความถี่เดียวและกำหนดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning, SPP) โดยจะใช้ข้อมูลซูโดเรนจ์ (Pseudorange) มาประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดแบบทันที ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่สูงในระดับ 10 เมตร [12] ในส่วนจุดตรวจสอบภาคพื้นดิน (Check Point : CP) ใช้การสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS ที่มีความแม่นยำสูง โดยใช้วิธีการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative) โดยอาศัยข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Carrier phase) ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการสำรวจแบบ RTK และอ้างอิงตำแหน่งด้วยค่าพิกัดท้องถิ่นกับหมุดควบคุมในพื้นที่ ความถูกต้องทางตำแหน่งอยู่ที่ 1.0-5.0 เซนติเมตร [13]

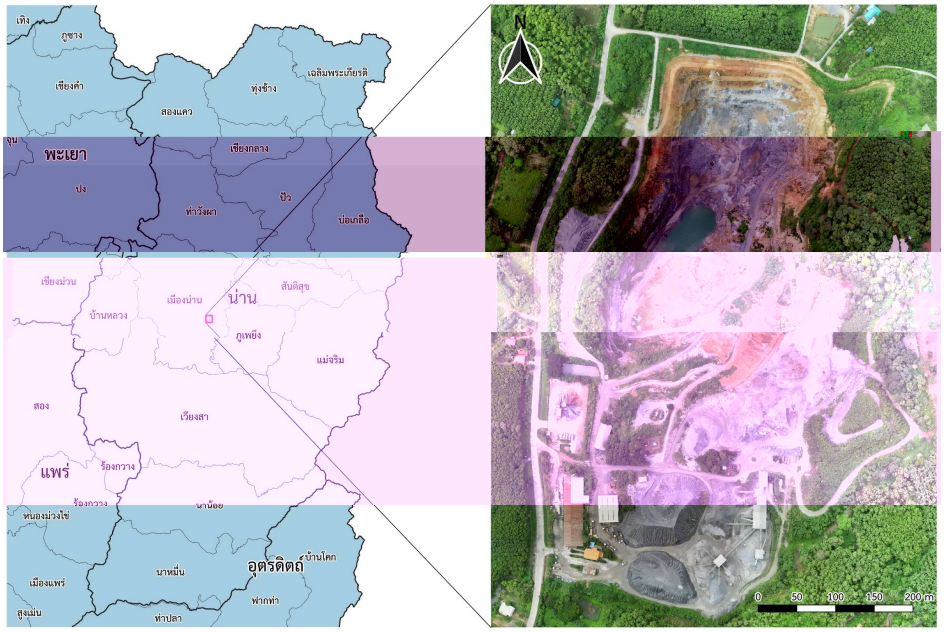
ถึงแม้ว่าพิกัดจุดเปิดถ่ายของภาพจาก UAV มีความคลาดเคลื่อนสูง แต่กระบวนการประมวลผลมีการสร้าง Auto tie points เกิดเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation, AT) ได้จากการประมวลผลทั้งการเล็งสกัดย้อนและการเล็งสกัด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมการสภาวะร่วมเส้น นำมาใช้ในการปรับแก้และคำนวณค่าพิกัดภาคพื้นดินที่ไม่ทราบค่า รวมไปถึงคำนวณปรับแก้ค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอก ซึ่งในปัจจุบันการประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะใช้วิธีคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสงโดยการปรับแก้ด้วยวิธี Least Square Adjustment ทำให้ความถูกต้องของข้อมูลมีค่าดีขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบความถูกต้องแบบสัมบูรณ์ (Absolute) ระหว่างจุดต่อจุดของข้อมูลจากการสำรวจด้วย UAV กับข้อมูลสำรวจตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ยังพบเจอปัญหาความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างของระบบพิกัดตำแหน่งจาก UAV ที่ได้จากวิธี SSP กับระบบพิกัดจุด CP ที่สำรวจด้วยวิธี RTK ดังนั้นการทดสอบความถูกต้องจำเป็นต้องแปลงพิกัดตำแหน่งของข้อมูล UAV ไปสู่ระบบพิกัดตำแหน่งของจุด CP เพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนจากระบบพิกัดตำแหน่งของทั้ง 2 ข้อมูลที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV ด้วยการทดสอบทางราบจากแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและทางดิ่งจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล โดยใช้วิธีการแปลงพิกัดตำแหน่งข้อมูลจาก UAV ไปยังระบบพิกัดตำแหน่งของจุด CP โดยใช้วิธีการเลื่อนแกน (Translation) และหมุนแกนรอบจุดศูนย์กลาง (Rotation about the Origin) โดยปราศจากการย่อและขยาย (Scale) ประเมินความถูกต้องตามมาตรฐานแห่งชาติสำหรับความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่ (National Standard for Spatial Data Accuracy, NSSDA) เพื่อเป็นการประเมินความเหมาะสมของข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขจากการสำรวจด้วย UAV แบบไม่ใช้ GCP ในการประยุกต์ใช้งานข้อมูลทั้งในทางราบและทางดิ่ง

## 2. พื้นที่และเครื่องมือสำหรับการศึกษา

### *2.1 พื้นที่ศึกษา*

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้พื้นที่เหมืองเปิดของบริษัท ส.เต็งไตรรัตน์ (น่าน) จำกัด ตั้งอยู่ที่ตำบลผาสิงห์ อำเภอเมือง จังหวัดน่าน (N 18.825085°, E 100.734757°) พื้นที่ศึกษามีขนาดประมาณ 0.532 ตารางกิโลเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 เนื่องจากพื้นที่เหมืองหินมีความลาดชันและต่างระดับค่อนข้างมาก โดยค่าระดับต่ำสุดอยู่ที่ 240.305 เมตร และค่าระดับสูงสุดอยู่ที่ 390.720 เมตร จึงมีความท้าทายในการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลทั้งในทางราบและทางดิ่งจากการสำรวจด้วย UAV แบบไม่ใช้ GCP




**รูปที่ 1** พื้นที่ศึกษาเหมืองแร่หินปูนเพื่ออุตสาหกรรมการก่อสร้าง บริษัท ส.เต็งไตรรัตน์ (น่าน) จำกัด

*2.2 อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล*

*2.2.1 อากาศยานไร้คนขับ*

งานวิจัยนี้ใช้ UAV ต้นทุนต่ำ DJI Phantom 4 Pro Plus (V.2.0) เป็น UAV ที่นิยมใช้ทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ ได้รับการพัฒนามาจากรุ่นเดิม คือ DJI Phantom 4 และ DJI Phantom 4 Pro โดยมีการพัฒนามาพร้อมกับระบบกันสั่น 3 แกนหมุนอิสระ และเซ็นเซอร์กล้อง CMOS ขนาด 1 นิ้ว กล้องความละเอียด 20 ล้านจุดภาพ เลนส์มุมกว้าง f/2.8 ที่ได้รับการปรับปรุงใหม่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น จับภาพได้กว้างขึ้น เก็บรายละเอียดได้ดีขึ้น และความแม่นยำของสีที่เที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น โดยคุณสมบัติเฉพาะของ DJI Phantom 4 Pro Plus (V.2.0) แสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** คุณสมบัติเฉพาะของ DJI Phantom 4 Pro Plus (V.2.0)

| | |
|---|---|
| ขนาดและน้ำหนัก | 35 เซนติเมตร และ 1375 กรัม |
| ระยะเวลาบิน | 30 นาที |
| ความละเอียดกล้อง | 20 ล้านจุดภาพ |
| ขนาดเซ็นเซอร์กล้อง | 1 นิ้ว CMOS |
| ขนาดภาพ | 3:2 อัตราส่วน 5472×3648 |
| ระบบดาวเทียมระบุตำแหน่ง | GPS/GLONASS |
| ความถูกต้องตำแหน่งขณะลอยตัวกับที่ | แนวดิ่ง ±0.5 เมตร<br>แนวราบ ±1.5 เมตร |
| ระบบกันสั่น | 3 แกน (pitch, roll, yaw) |

*2.2.2 เครื่องสำรวจตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS*

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องสำรวจตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS รุ่น Topcon Hiper V เป็นเครื่องรับสัญญาณชนิด 2 ความถี่ มีช่องรับสัญญาณจำนวน 226 ช่อง รองรับการสำรวจหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์วิธี Static และ RTK โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการสำรวจวิธี Static ในการโยงยึดหมุดควบคุมเข้ามาในพื้นที่ และใช้วิธี RTK สำรวจจุด CP ในพื้นที่ศึกษา โดยความถูกต้องของการสำรวจที่ระบุไว้ในคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องมือวิธี static อยู่ที่ 3 mm + 0.4 ppm ในทางราบ และ 5 mm + 0.5 ppm ในทางดิ่ง ส่วนวิธี RTK อยู่ที่ 5 mm + 0.4 ppm ในทางราบ และ 10 mm + 0.8 ppm ในทางดิ่ง [14]

*2.2.3 ซอฟต์แวร์ประมวลผลและวิเคราะห์ผล*

งานวิจัยใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape ประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV เพื่อสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข ทดสอบความถูกต้องของข้อมูลด้วยการสร้างจุดพิกัดบนแผนที่และดึงค่าระดับจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขด้วยซอฟต์แวร์ QGIS จากนั้นนำออกข้อมูลค่าพิกัดตำแหน่งทั้งทางราบและทางดิ่ง ทดสอบความถูกต้องกับข้อมูลจุดพิกัดตำแหน่งอ้างอิงที่ได้จากการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK

*2.3 การแปลงพิกัด*

การแปลงพิกัดในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการเลื่อนแกน (Translation) และการหมุนแกนรอบจุดกำเนิด (Rotation about the Origin) โดยการแปลงพิกัดไม่มีการย่อและขยายตามแนวแกน (Scaling) เพื่อรักษาข้อมูลต้นฉบับที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้อง

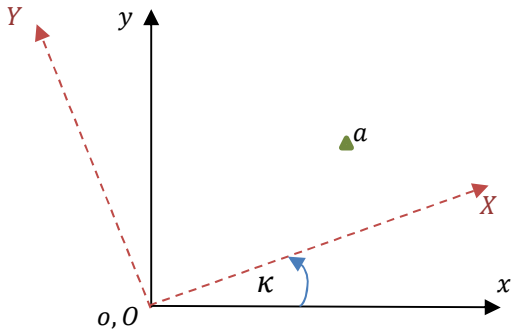
*2.3.1 การเลื่อนแกน*

มีระบบพิกัดฉากแบบ 3 มิติสองระบบได้แก่ระบบพิกัดฉาก XYZ (XYZ-frame) มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุด O และระบบพิกัดฉาก xyz (xyz-frame) ที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่จุด o โดยที่ทั้ง 2 ระบบมีหน่วยวัดเดียวกัน เมื่อทราบพิกัดของจุดกำเนิด o ของ xyz-frame ใน XYZ-frame คือ $X_o$, $Y_o$, $Z_o$ จะสามารถแปลงพิกัดของจุด a ใด ๆ ใน xyz-frame ไปยัง XYZ-frame ได้ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (1)$$

*2.3.2 การหมุนแกนรอบจุดกำเนิด*

การหมุนแกนรอบจุดกำเนิดเพื่อแปลงพิกัดในงานวิจัยนี้ทำการหมุดรอบแกน z เท่านั้นเพื่อปรับทิศทางข้อมูลพิกัดทางราบของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ เนื่องจากการหมุนไม่ทำให้ค่าความถูกต้องของข้อมูลแบบสัมพัทธ์เปลี่ยนไป ระบบพิกัดฉาก 3 มิติสองระบบ xyz และ XYZ มีจุดกำเนิดเดียวกันแต่การวางตัว (Orientation) ไม่ขนานกัน คือ ระบบพิกัดฉาก xyz ถูกหมุนรอบแกน z ไปเป็นมุม $\kappa$ ผลเกิดจากการหมุนระบบพิกัด xyz รอบแกน z ทวนเข็มนาฬิกาไปเป็นมุม $\kappa$ แสดงได้ในรูปที่ 2




รูปที่ 2 การแปลงพิกัด xyz ไปเป็น XYZ ที่เกิดจากการหมุนแกน z ทวนเข็มนาฬิกาไปเป็นมุม $\kappa$

เมื่อแสดงสมการความสัมพันธ์รวมของการแปลงพิกัดฉาก xyz ไปเป็น XYZ ที่เกิดจากการหมุนทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม $\kappa$ จะได้สมการที่ (2) ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\ \kappa & sin\ \kappa & 0 \\ -sin\ \kappa & cos\ \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

*2.3.3 ผลรวมของพารามิเตอร์การแปลงพิกัด*

การแปลงพิกัดฉากสามมิติมีลักษณะเช่นเดียวกับการแปลงพิกัดฉากสองมิติ โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งสองระบบโดนรวมทุกองค์ประกอบของการแปลงพิกัด เริ่มต้นด้วยการหมุนแกนของระบบพิกัดทั้งสองระบบให้ขนานกันก่อน จากนั้นเป็นการเลื่อนแกน จะได้เป็นสมการที่ (3)

$$\begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\ \kappa & sin\ \kappa & 0 \\ -sin\ \kappa & cos\ \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad (3)$$

สมการข้างต้นคือ Hermert Transformation ของการแปลงค่าพิกัดสามมิติที่ไม่มีการย่อ ขยายและรวมถึงไม่มีการหมุนรอบแกน x และแกน y ดังนั้นในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์ในการแปลงค่าพิกัดคือ $\kappa$, $X_o$, $Y_o$ และ $Z_o$ โดยคำนวณจากจุดพิกัดฉากสามมิติอ้างอิงอย่างน้อย 2 จุด

*2.4 การประเมินความถูกต้อง*

การทดสอบความถูกต้องของงานวิจัยเลือกใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน NSSDA ได้จัดทำขึ้นเพื่อประเมินความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่เชิงเลขที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squares Error, RMSE) ของ X, Y, และ Z ที่มาตราส่วนภาคพื้นดิน [15] โดยขั้นตอนการคำนวนและสูตรสมการอธิบายได้ดังต่อไปนี้

*2.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Errors)*

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูลสูตรคำนวณดังสมการที่ (4)

$$\bar{x} = \frac{1}{(n)} \sum_{i=1}^{n} x_i \quad (4)$$

เมื่อ

$x_i$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน
$n$ คือ จำนวนจุดทดสอบ
$i$ คือ ตัวเลขระหว่าง 1 ถึง $n$

*2.4.2 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (Standard Deviation)*

การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนใช้สมการที่ (5)

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

เมื่อ

$x_i$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อน
$\bar{x}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย
$n$ คือ จำนวนจุดทดสอบ
$i$ คือ ตัวเลขระหว่าง 1 ถึง $n$

*2.4.3 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squares Error)*

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเป็นการหารากที่สองเฉลี่ยของชุดข้อมูลผลต่างของพิกัดตำแหน่งข้อมูลจาก UAV กับพิกัดตำแหน่งอ้างอิงที่ความถูกต้องสูงกว่าจากการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS สามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left( x_{i(UAV)} - x_{i(GNSS)} \right)^2} \quad (6)$$

เมื่อ

$x_{i(UAV)}$ คือ พิกัดตำแหน่งจากการสำรวจด้วย UAV
$x_{i(GNSS)}$ คือ พิกัดตำแหน่งอ้างอิงที่มีความถูกต้องสูงกว่าจาก GNSS วิธี RTK
$n$ คือ จำนวนจุดทดสอบ
$i$ คือ ตัวเลขระหว่าง 1 ถึง $n$

*2.4.4 ความถูกต้องของ NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%*

ความถูกต้องตำแหน่งทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในสมการที่ (7) และความถูกต้องตำแหน่งทางดิ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$95\%\ \text{confidence Horizontal} = 1.7308(RMSE_r) \quad (7)$$

$$95\%\ \text{confidence Vertical} = 1.9600(RMSE_z) \quad (8)$$

## 3. การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ 1) การสำรวจข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วย UAV 2) การสำรวจจุดตรวจสอบความถูกต้องและจุดอ้างอิงด้วยดาวเทียม GNSS 3) การประมวลผลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV 4) การแปลงระบบพิกัดแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข 5) การทดสอบความถูกต้องทางราบของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### *3.1 การสำรวจข้อมูลภาพถ่ายด้วย UAV*

การสำรวจภาพถ่ายด้วย UAV ได้สำรวจข้อมูลในวันที่ 30 กรกฎาคม 2565 เวลา 14 นาฬิกา 10 นาที กำหนดแผนการบินในเครื่องควบคุม UAV ผ่านแอพพลิเคชัน 3Dsurvey Pilot ที่ความสูง 90 เมตรจากจุดขึ้นบิน ความละเอียดของจุดภาพอยู่ที่ 2.8 เซนติเมตรต่อหนึ่งจุดภาพ โดยมีแนวบินทั้งหมด 20 แนว ทิศทาง เหนือ-ใต้ มีภาพถ่ายทั้งหมด 1380 ภาพ โดยตั้งค่า Overlap ภาพไว้ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ และ Sidelap 75 เปอร์เซ็นต์

### *3.2 สำรวจจุดตรวจสอบความถูกต้องด้วยดาวเทียม GNSS*

การสำรวจจุดตรวจสอบความถูกต้องและจุดอ้างอิงในพื้นที่ศึกษาใช้การสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK โดยอ้างอิงพิกัดตำแหน่งจากหมุดควบคุมพิกัดตำแหน่งถาวรของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์หมายเลขหมุด A100265 ตั้งอยู่ที่ศูนย์พัฒนาฝีมือแรงงานจังหวัดน่าน อ้างอิงตามระบบแผนที่ UTM WGS84 Zone 47N โดยมีค่าพิกัด N = 2083036.136 เมตร, E = 684759.473 เมตร และ H = 258.573 เมตร เนื่องจากหมุดควบคุม A100265 อยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาระยะทางประมาณ 2.5 กิโลเมตร และเป็นพื้นที่แนวเชิงเขา ทำให้การสำรวจด้วยวิธี RTK มีข้อจำกัดในการส่งสัญญาณวิทยุค่าแก้ระหว่างเครื่อง Base กับ Rover จึงมีการโยงยึดหมุดอ้างอิงใหม่เข้ามาในพื้นที่ด้วยการสำรวจวิธีแบบสถิต (Static) เพื่อสร้างจุด Base ในการอ้างอิงการรังวัด RTK ในพื้นที่ศึกษาที่มีระยะทางระหว่าง Base กับ Rover ที่ใกล้ขึ้น งานวิจัยนี้กำหนดจุด CP ในพื้นที่ศึกษาจำนวน 11 จุดครอบคลุมพื้นที่ศึกษาประมาณ 0.532 ตารางกิโลเมตร ซึ่งตามมาตรฐานการตรวจสอบความถูกต้องของ American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) ระบุไว้ว่า ในพื้นที่ขนาดไม่เกิน 500 ตารางกิโลเมตร ต้องมีจุด CP อย่างน้อย 20 จุด [15] แต่เมื่อเทียบสัดส่วนขนาดของพื้นที่ศึกษาจะเห็นได้ว่ามีขนาดเพียงแค่ 0.1 เปอร์เซ็นต์จากเกณฑ์มาตรฐานเท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้กำหนดจุด CP เพียง 11 จุดเท่านั้น ซึ่งมีตำแหน่งกระจายตัวครอบคลุมทั่วพื้นที่ศึกษา ส่วนจุดอ้างอิงการแปลงพิกัดมีทั้งหมด 2 จุด เนื่องจากเป็นจำนวนขั้นต่ำที่ใช้อ้างอิงในการแปลงค่าพิกัด โดยมีจุดกำเนิดการหมุนแกนอยู่กึ่งกลางของข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 3 การสำรวจหาพิกัดตำแหน่งด้วยวิธี RTK ผู้วิจัยใช้การเก็บพิกัดตำแหน่ง epoch ละ 1 วินาที โดยเฉลี่ยค่าพิกัดตำแหน่งต่อ 1 จุดเป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ค่ามีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น




**รูปที่ 3** แผนที่แสดงตำแหน่งจุดตรวจสอบความถูกต้อง (CP) จุดอ้างอิงการแปลงพิกัด (TF) และจุดกำเนิดการหมุนแกน (Origin)

### *3.3 การประมวลภาพถ่ายจาก UAV*

ภาพถ่ายจาก UAV ประมวลผลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape แบบไม่ใช้ GCP โดยขั้นตอนการประมวลผลและค่าพารามิเตอร์อ้างอิงวิธีการตามคู่มือการประมวลผลของทางผู้ผลิตซอฟต์แวร์ [16] โดยกำหนดระบบพิกัดแผนที่เป็น UTM WGS84 Zone 47N และนำออกข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขมาทดสอบความถูกต้องด้วยจุด CP จากการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK

### *3.4 การแปลงพิกัด*

หลังจากประมวลผลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข ข้อมูลจาก UAV จะถูกแปลงพิกัดให้อยู่ในระบบเดียวกับจุดตรวจสอบความถูกต้อง การแปลงพิกัดใช้ค่าพารามิเตอร์มุมการหมุนแกนและค่าการย้ายแกนโดยคำนวนจากสมการที่ (3) โดยใช้จุดอ้างอิงที่เป็นระบบพิกัดของจุดตรวจสอบจำนวน 2 จุดเพื่อหาพารามิเตอร์ 4 ตัวแปลคือ $\kappa$, $X_o$, $Y_o$ และ $Z_o$ โดยการแปลงเป็นการย้ายระบบพิกัดเท่านั้น ไม่มีการปรับแก้ข้อมูลดั้งเดิมที่ได้จากประมวลผล เพื่อประเมินความถูกต้องของข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขที่ได้จากการประมวลผลโดยไม่ใช้ GCP

*3.5 การทดสอบความถูกต้อง*

การทดสอบความถูกต้องทางราบและทางดิ่งของข้อมูลในงานวิจัยนี้มีการทดสอบ 2 ขั้นตอน คือ การทดสอบในขั้นตอนลำดับแรกเป็นการทดสอบหาค่าต่างของระบบพิกัดจาก UAV เมื่อเทียบกับจุด CP เพื่อประเมินความแตกต่างของระบบพิกัดที่เกิดขึ้นระหว่างระบบพิกัดของ UAV ที่ได้จากการกำหนดตำแหน่งพิกัดด้วยดาวเทียม GNSS วิธี SPP ซึ่งเป็นการอ้างอิงตำแหน่งแบบสากล ส่วนจุด CP ได้จากการสำรวจแบบสัมพัทธ์วิธี RTK ซึ่งเป็นการอ้างอิงหมุดควบคุมท้องถิ่น ซึ่งเป็นความท้าทายของงานวิจัยนี้ ที่ต้องการแปลงพิกัดให้อยู่ในระบบเดียวกัน เพื่อทดสอบความถูกต้องทางตำแหน่งที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่ได้เกิดจากความแตกต่างของระบบพิกัด การทดสอบในลำดับที่สองเป็นการทดสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของพิกัดจาก UAV ที่ได้รับการแปลงให้อยู่ในระบบเดียวกันกับจุด CP ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน ค่า RMSE และค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ทั้งทางราบและทางดิ่ง

## 4. ผลการศึกษา

*4.1 ผลการสำรวจจุดตรวจสอบภาคพื้นดิน (Check Point)*

ผลการสำรวจจุด CP ทั้งหมด 11 จุดครอบคลุมพื้นที่ศึกษาเหมืองเปิด จากการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK โดยอ้างอิงค่าพิกัดจากหมุดควบคุมภาคพื้นดิน A100265 ที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS วิธีสถิต Static ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ใช้ระบบพิกัดแผนที่ UTM WGS84 Zone 47N และค่าระดับอ้างอิงจากระดับทะเลปานกลาง โดยการศึกษาครั้งนี้ได้มีการโยงยึดค่าพิกัดจากหมุดควบคุม A100256 เข้าไปในพื้นที่ศึกษาด้วยการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธีสถิต (Static) เพื่อสร้างหมุดควบคุมใหม่ใช้เป็นสถานีฐานให้กับการสำรวจด้วยวิธี RTK ในพื้นที่ เพื่อกำจัดปัญหาการสำรวจด้วยวิธี RTK ที่มีข้อจำกัดในการรับส่งค่าแก้แบบทันทีทันใดด้วยคลื่นวิทยุในระยะทางที่ไกล ทำให้สัญญาณไม่มีความต่อเนื่อง โดยผลการสำรวจจุด CP ทั้ง 11 จุดแสดงรายละเอียดค่าพิกัดและค่าระดับในตารางที่ 2

**ตารางที่ 2** ค่าพิกัดตำแหน่งจุดตรวจสอบความถูกต้องภาคพื้นดิน (CP)

| ชื่อจุด | Northing (m) | Easting (m) | Elevation (m) |
|---|---|---|---|
| CP01 | 2082742.610 | 682747.216 | 258.049 |
| CP02 | 2082683.752 | 682963.249 | 264.846 |
| CP03 | 2082628.750 | 682811.210 | 205.418 |
| CP04 | 2082531.269 | 682700.493 | 256.055 |
| CP05 | 2082427.585 | 682964.722 | 282.559 |
| CP06 | 2082362.099 | 682785.875 | 233.330 |
| CP07 | 2082351.314 | 682633.327 | 255.584 |
| CP08 | 2082225.604 | 682930.913 | 289.087 |
| CP09 | 2082184.666 | 682749.101 | 267.706 |
| CP10 | 2082061.868 | 682680.275 | 252.641 |
| CP11 | 2082008.622 | 682817.180 | 256.008 |

*4.2 ผลการสำรวจและประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV*

ผลจากการสำรวจและประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจาก UAV โดยไม่ใช้ GCP ในซอฟต์แวร์ Agisoft Metashape นำออกข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข เพื่อดึงค่าพิกัดและค่าระดับเพื่อใช้ทดสอบความถูกต้อง ซอฟต์แวร์ QGIS ถูกใช้สร้างจุดตำแหน่งที่เป็นตำแหน่งเดียวกันกับจุด CP บนแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศซึ่งมีสัญลักษณ์กากบาทสีแดงในจุดภาพ และใช้คำสั่ง Sample raster values ในการดึงค่าระดับจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ทั้ง 11 จุดจะได้ค่าพิกัดตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ค่าพิกัดตำแหน่งจาก UAV ในตำแหน่งเดียวกับ CP

| ชื่อจุด | Northing (m) | Easting (m) | Elevation (m) |
|---|---|---|---|
| UAV01 | 2082739.625 | 682738.343 | 305.406 |
| UAV02 | 2082680.504 | 682954.186 | 313.103 |
| UAV03 | 2082625.775 | 682802.349 | 252.940 |
| UAV04 | 2082528.412 | 682691.325 | 303.073 |
| UAV05 | 2082424.380 | 682955.236 | 330.726 |
| UAV06 | 2082359.185 | 682776.564 | 280.689 |
| UAV07 | 2082348.567 | 682623.962 | 302.356 |
| UAV08 | 2082222.537 | 682921.116 | 337.126 |
| UAV09 | 2082181.804 | 682739.435 | 314.946 |
| UAV10 | 2082059.136 | 682670.554 | 299.680 |
| UAV11 | 2082005.755 | 682807.341 | 303.613 |

*4.3 ผลการแปลงพิกัด*

การแปลงพิกัดจำเป็นต้องใช้ทราบค่าของระบบพิกัดที่ต้องการแปลงและระบบพิกัดที่ต้องการแปลงไปหาอย่างน้อย 2 จุดเพื่อแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ $\kappa$, $X_o$, $Y_o$ และ $Z_o$ จากสมการที่ (3) โดยจุด TF คือค่าพิกัดที่ต้องการแปลงไปหาส่วนจุด TFUAV คือค่าพิกัดที่ต้องการแปลงและจุด Origin คือจุดศูนย์กลางที่ใช้หมุนรอบแกน z ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 4 ผลการแก้สมการได้ค่าพารามิเตอร์ $\kappa$ = -0.0014 เรเดียน $X_o$= 9.449 เมตร $Y_o$ = 3.035 เมตร $Z_o$= -47.541 เมตร

**ตารางที่ 4** ค่าตำแหน่งพิกัดใช้แก้สมการหาค่าพารามิเตอร์

| ชื่อจุด | Northing (m) | Easting (m) | Elevation (m) |
|---|---|---|---|
| TF01 | 2082475.183 | 682912.718 | 257.996 |
| TF02 | 2082282.477 | 682737.610 | 269.66 |
| TFUAV01 | 2082472.038 | 682903.392 | 305.926 |
| TFUAV02 | 2082279.616 | 682728.046 | 316.811 |
| Origin | 2082375.925 | 682838.671 | - |

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวแปรนำกลับไปคำนวนแปลงค่าพิกัดของจุดที่ได้จากการสำรวจด้วย UAV จะได้ค่าพิกัดใหม่เป็นชื่อ UAVTF ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5 จุดพิกัดนี้เป็นจุดที่อยู่ในระบบพิกัดเดียวกับจุดตรวจสอบความถูกต้อง การแปลงพิกัดจะรักษาความดั้งเดิมของข้อมูลไว้ โดยไม่มีการปรับย่อขยาย (Scale) เพื่อเป็นการทดสอบสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลแบบไม่ได้ปรับแก้ด้วย GCP

**ตารางที่ 5** ค่าพิกัดตำแหน่งจาก UAV ตำแหน่งเดียวกับ CP หลังจากแปลงพิกัด

| ชื่อจุด | Northing (m) | Easting (m) | Elevation (m) |
|---|---|---|---|
| UAVTF01 | 2082742.519 | 682747.280 | 257.865 |
| UAVTF02 | 2082683.702 | 682963.205 | 265.562 |
| UAVTF03 | 2082628.759 | 682811.445 | 205.399 |
| UAVTF04 | 2082531.239 | 682700.559 | 255.532 |
| UAVTF05 | 2082427.580 | 682964.617 | 283.185 |
| UAVTF06 | 2082362.133 | 682786.037 | 233.149 |
| UAVTF07 | 2082351.300 | 682633.450 | 254.816 |
| UAVTF08 | 2082225.689 | 682930.781 | 289.586 |
| UAVTF09 | 2082184.700 | 682749.158 | 267.405 |
| UAVTF10 | 2082061.935 | 682680.450 | 252.139 |
| UAVTF11 | 2082008.747 | 682817.312 | 256.072 |

*4.4 ผลการทดสอบความถูกต้อง*

ผลการทดสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและค่าระดับจากแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มีค่าค่อนข้างสูง เนื่องจากข้อมูลจาก UAV กับข้อมูลจากจุด CP มีความแตกต่างกันในวิธีการสำรวจตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ในวิธี SPP กับ RTK ดังนั้นจะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ($\bar{x}$) ในทิศทางเหนือ (N) เท่ากับ -2.951 เมตร ในทิศทางตะวันออก (E) เท่ากับ -9.377 เมตรและในทางดิ่ง (Z) เท่ากับ 47.489 เมตรดังแสดงในตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่า $\bar{x}$ มีความคลาดเคลื่อนในทิศทางเดียวกันทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 4

เนื่องจากความแตกต่างของระบบพิกัดที่ได้จากการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS ของ UAV และจุด CP แต่เมื่อทดสอบด้วยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (SD) ได้ค่า N = 0.168, E = 0.356 และ Z = 0.490 ดังแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่า SD มีค่าที่น้อยเมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เพราะค่า SD คำนวนโดยอ้างอิงจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทำให้ไม่มีผลกระทบกับค่าความคลาเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างของระบบพิกัด ส่วนของค่า $RMSE_r$ ทางราบอยู่ที่ 9.838 เมตร และในทางดิ่ง $RMSE_z$ อยู่ที่ 47.491 เมตร

**ตารางที่ 6** ผลการทดสอบความถูกต้องข้อมูลจาก UAV ด้วยจุด CP

| ชื่อจุด | ΔN (m) | ΔE (m) | ΔZ (m) |
|---|---|---|---|
| UAV_CP_01 | -2.985 | -8.873 | 47.357 |
| UAV_CP_02 | -3.248 | -9.063 | 48.257 |
| UAV_CP_03 | -2.975 | -8.861 | 47.522 |
| UAV_CP_04 | -2.857 | -9.168 | 47.018 |
| UAV_CP_05 | -3.205 | -9.486 | 48.167 |
| UAV_CP_06 | -2.914 | -9.311 | 47.359 |
| UAV_CP_07 | -2.747 | -9.365 | 46.772 |
| UAV_CP_08 | -3.067 | -9.797 | 48.039 |
| UAV_CP_09 | -2.862 | -9.666 | 47.240 |
| UAV_CP_10 | -2.732 | -9.721 | 47.039 |
| UAV_CP_11 | -2.867 | -9.839 | 47.605 |
| ค่าเฉลี่ย | -2.951 | -9.377 | 47.489 |
| SD | 0.168 | 0.356 | 0.490 |
| RMSE | 2.955 | 9.383 | 47.491 |
| $RMSE_r$ | 9.838 | | |

**รูปที่ 4** แผนที่ตำแหน่งทิศ 4 ป ขป ศ 4 ท

จากผลทดสอบความคลาดเคลื่อนจะเห็นได้ว่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวที่แสดงในตารางที่ 6 ไม่ได้เกิดจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในพื้นที่ศึกษา แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสาเหตุเกิดจากความแตกต่างของระบบพิกัดแผนที่ ไม่ใช่ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทางตำแหน่ง การตรวจสอบความถูกต้องมีความจำเป็นต้องทำให้ข้อมูลทั้ง 2 แหล่งอยู่ในระบบพิกัดเดียวกันก่อนทำการทดสอบ โดยการแปลงระบบพิกัดด้วยค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการแก้สมการ

0

ซ สก / พ
0า อหห้ คามำเจ ล กนข □ 1 □ ตุ□ อ-ล

จะเห็นได้ว่าแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศแบบไม่ใช้ GCP จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำในพื้นที่เหมืองเปิด เมื่อนำมาทดสอบความถูกต้องโดยมีระบบพิกัดเดียวกับจุดตรวจสอบ ความคลาดเคลื่อนทางราบจะสูงกว่าวิธีที่ใช้ GCP [9] ประมาณ 3 เท่า และความคลาดเคลื่อนทางดิ่งจะสูงกว่าประมาณ 8 เท่า ความคลาดเคลื่อนทางดิ่งที่มีค่าค่อนข้างสูงอาจเกิดจากพื้นเหมืองเปิดที่มีความสูงต่ำของภูมิประเทศค่อนข้างมาก ส่วนลึกสุดของเหมืองและส่วนที่สูงที่สุดมีค่าต่างระดับอยู่ที่ 100 เมตร ทำให้กระบวนการประมวลผลการรังวัดด้วยภาพถ่ายมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งถ้าหากพื้นที่ภูมิประเทศมีความลาดชันปกติ ความถูกต้องทางราบและทางดิ่งอาจจะมีค่าที่ดีขึ้น

## 5. สรุปผล

การทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศและแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายที่ได้จากการสำรวจด้วย UAV ต้นทุนต่ำแบบไม่ปรับแก้ด้วย GCP เมื่อทำการทดสอบความถูกต้องด้วยจุดตรวจสอบที่สำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าที่สูงเนื่องจากค่าทดสอบเป็นค่าความคลาดเคลื่อนร่วมกับค่าต่างของระบบพิกัดระหว่าง UAV กับจุด CP แต่เมื่อแปลงพิกัดให้อยู่ระบบเดียวกันเพื่อกำจัดค่าต่างของระบบพิกัดทำให้ค่าทดสอบเหลือแค่ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล ผลทดสอบความถูกต้องสรุปได้ว่า ในระดับความเชื่อมั่น 95% ของมาตรฐาน NSSDA แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ สามารถใช้ทำแผนที่มาตราส่วนที่เล็กกว่า 1:400 และแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลขสามารถทำแผนที่เส้นชั้นความสูงกำหนดช่วงเส้นได้ในระดับ 1.4 เมตรขึ้นไป ซึ่งตามมาตรฐานสามารถใช้งานแผนที่และ GIS ได้

การแปลงพิกัดข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ (ทางราบ) และแบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข (ทางดิ่ง) เป็นการย้ายพิกัดข้อมูลจาก UAV ให้อยู่ในระบบพิกัดเดียวกันกับจุดตรวจสอบ โดยที่ยังคงรูปร่างลักษณะเดิมของข้อมูลไว้ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องกับจุดตรวจสอบอ้างอิงที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงกว่า ความถูกต้องที่ได้จากการทดสอบเป็นค่าความถูกต้องทางตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (Relative) ถึงแม้ว่าการรังวัดด้วยภาพถ่ายจาก UAV แบบไม่ใช้ GCP มีค่าพิกัดตำแหน่งที่แตกต่างจากการสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK ค่อนข้างมาก แต่ค่าความถูกต้องของตำแหน่งแบบสัมพัทธ์มีความแม่นยำในเกณฑ์มาตรฐานของการทำแผนที่ด้าน GIS

จากการศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้พื้นที่เหมืองเปิดที่มีความลาดชันค่อนข้างสูงซึ่งเป็นพื้นที่มีความท้าทายในการประเมินความถูกต้อง เพราะพื้นที่ถ่ายภาพที่ระดับความสูงแตกต่างกันมาก ก่อให้เกิดผลกระทบต่อจุดภาพจากความสูงที่แตกต่างกัน (Relief displacement) ทำให้ความคลาดเคลื่อนในพื้นที่ศึกษาอาจมีค่าที่สูงกว่าพื้นที่ทั่วไป ถ้าหากมีการสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศด้วย UAV ในพื้นที่ค่าระดับมีความแตกต่างกันน้อย อาจลดผลกระทบต่อจุดภาพที่อาจคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งอ้างอิง ทำให้ค่าความถูกต้องมีค่าที่ยิ่งดีขึ้น

ถึงแม้ว่าผลการทดสอบความถูกต้องทางราบ $RMSE_r$ อยู่ที่ 0.144 เมตร และในทางดิ่ง $RMSE_z$ อยู่ที่ 0.470 เมตร แต่ความถูกต้องดังกล่าวเกิดจากการแปลงพิกัดซึ่งเป็นความถูกต้องแบบสัมพัทธ์ของชุดข้อมูลเดียวกัน ถ้าหากมีการสำรวจโดยไม่ใช้ GCP และประมวลผลข้อมูลคนละชุดกัน อาจส่งผลให้ตำแหน่งพิกัดของข้อมูลมีความต่างกัน ถ้าหากต้องใช้ข้อมูลร่วมกันแนะนำให้ประมวลผลร่วมกันหรือแปลงพิกัดร่วมกัน

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ส.เต็งไตรรัตน์ (น่าน) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การสำรวจ UAV และเครื่องสำรวจด้วยดาวเทียม GNSS ในการเก็บข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงทีมงานสำรวจของบริษัทที่ช่วยสำรวจเก็บข้อมูลในภาคสนามครั้งนี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

[1] Nex, F. and Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), pp. 1-15.

[2] Ansari, A. (2012). Use of point cloud with a low-cost UAV system for 3D mapping. *2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM)*, 13-15 Dec. 2012, pp. 131-134.

[3] Mogili, U.M.R. and Deepak, B.B.V.L. (2018). Review on Application of Drone Systems in Precision Agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, pp. 502-509.

[4] Appeaning Addo, K. and Jayson-Quashigah, P.-N. (2021). Chapter 7 - UAV photogrammetry and 3D reconstruction: application in coastal monitoring, *Unmanned Aerial Systems*, A. Koubaa and A.T. Azar, Editors., Academic Press. pp. 157-174.

[5] Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W. and Hu, Z. (2019). A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(3), pp. 320-333.

[6] Salas López, R., Terrones Murga, R.E., Silva-López, J.O., Rojas-Briceño, N.B., Gómez Fernández, D., Oliva-Cruz, M. and Taddia, Y. (2022). Accuracy Assessment of Direct Georeferencing for Photogrammetric Applications Based on UAS-GNSS for High Andean Urban Environments. *Drones*, 6, DOI: 10.3390/drones6120388.

[7] Varbla, S., Puust, R. and Ellmann, A. (2021). Accuracy assessment of RTK-GNSS equipped UAV conducted as-built surveys for construction site modelling. *Survey Review*, 53(381), pp. 477-492.

[8] Biquan, Z., Jiating, L., Lin, W. and Yeyin, S. (2020). Positioning accuracy assessment of a commercial RTK UAS. *Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping V*, 23 April 2020, pp. 09.

[9] Elkhrachy, I. (2021). Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Engineering Journal*, 60(6), pp. 5579-5590.

[10] Nagendran, S.K., Tung, W.Y. and Mohamad Ismail, M.A. (2018). Accuracy assessment on low altitude UAV-borne photogrammetry outputs influenced by ground control point at different altitude. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169(1), pp. 012031.

[11] Liba, N. and Berg-Jürgens, J. (2015). Accuracy of Orthomosaic Generated by Different Methods in Example of UAV Platform MUST Q. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 96(1), pp. 012041.

[12] Krasuski, K. and Wierzbicki, D. (2021). Application the SBAS/EGNOS Corrections in UAV Positioning. *Energies*, 14, DOI: 10.3390/en14030739.

[13] Hu, G.R., Khoo, H.S., Goh, P.C. and Law, C.L. (2003). Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning. *Journal of Geodesy*, 77(5), pp. 292-302.

[14] Corporation, T. (2017). *HIPER V VERSATILE FUNCTION GNSS RECEIVER [Brochure]*. Accessed 30 March 2023, Available: https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/hiper_v_broch_7010_2121_reve_sm.pdf.

[15] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2014). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), pp. A1-A26.

[16] Agisoft. (2022). *Orthomosaic & DEM generation (without GCPs)*. Accessed 5 january 2023, Available: https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000157908-orthomosaic-dem-generation-without-gcps-.