

เปรียบเทียบการรังวัดเพื่อคำนวณปริมาตรด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

COMPARISON OF TERRESTRIAL LASER SCANNER (TLS) AND UNMAN AERIAL VEHICLE (UAV) FOR VOLUME DETERMINATION IN MAE MOH MINE, LAMPANG

ธีรณีย์ ทองคำ^{1*} ธเนศพล บุญประกอบ¹ บุญฤทธิ์ เขียวอร่าม¹ ส.อ.ภานุวัฒน์ ทะนะอัน¹ อัษฎภาวูร ตอนจักร¹ จักรกฤษณ์ สิทธิยศ¹
ส.อ.วีระเชษฐ์ แสงเขียว¹ ส.อ.วรวิทย์ สวัสดิ์¹ และ ธนนันท์ แสนคำลือ¹

¹วิศวกรสำรวจ, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, จังหวัดลำปาง, ประเทศไทย

*Corresponding author address: 597050@egat.co.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการรังวัดปริมาตรดินและถ่านหินในเหมืองแม่เมาะโดยใช้การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ซึ่งเป็นวิธีการรังวัดที่มีความถูกต้องสูงและใช้ตรวจสอบปริมาตรการขุดดินและถ่านหินของเหมืองแม่เมาะในปัจจุบัน เปรียบเทียบกับการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับ ที่ใช้หลักการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานแบบปีกตรึง (Fix wing) รุ่น Wingtra One ประมวลผลแบบ Post Processing Kinematic (PPK) พร้อมหมุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ โดยผลของการเปรียบเทียบค่าแตกต่างของการรังวัดปริมาตรในพื้นที่ตัวอย่าง 3 พื้นที่ บริเวณเขตบ่อเหมืองแม่เมาะ พบว่าปริมาตรที่รังวัดได้หารด้วยขนาดพื้นที่แตกต่างกันในระดับไม่เกิน 8 เซนติเมตร ซึ่งสามารถนำมาใช้ในงานรังวัดเก็บรายละเอียดที่ไม่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูงมากได้ โดยประหยัดเวลาการทำงานภาคสนามและเพิ่มพื้นที่การรังวัดในแต่ละวันได้กว้างมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน, เหมืองแม่เมาะ

Abstract

The aim of this study is to compare Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for volume determination. Nowadays, TLS is a high accuracy equipment for coal and overburden waste volume determination in Mae Moh mine, Lampang province. UAV is also used to measure coal and overburden waste volume according to aerial photogrammetry theory by using Wingtra One fixed-wing UAV with GNSS Post Processing Kinematic (PPK) and Ground Control Point (GCP). Both equipment operated in three study areas in Mae Moh mine pit. The result of comparison indicated volume per area different less than 8 cm. Hence, it is acceptable for UAV to be used in a common accuracy requirement work, which can save time to operate and cover larger areas in each operation.

Keywords: UAV, Terrestrial Laser Scanner, Mae Moh mine

1. คำนำ

การรังวัดเพื่อคำนวณปริมาตรการขุดดินและถ่านหินของเหมืองแม่เมาะในปัจจุบันใช้วิธีการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner, TLS) โดยการนำอุปกรณ์ไปตั้งสแกนบริเวณพื้นที่การทำงานขุดดิน ซึ่งในหลายพื้นที่การตั้งกล้องบนพื้นดินมักจะถูกบดบังการมองเห็นจากกองดิน เครื่องจักรและยานพาหนะต่าง ๆ ที่ดำเนินการอยู่ภายในบ่อเหมือง ทำให้เสียเวลาในการเพิ่มจุดตั้งกล้องในการสแกนหลายครั้ง และในหลายพื้นที่การหาตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการตั้งอุปกรณ์เลเซอร์สแกนภาคพื้นดินนั้นเป็นไปได้ยาก จากงานวิจัยที่เปรียบเทียบปริมาตรการรังวัดจากอากาศยานไร้คนขับ (Unman Aerial Vehicle, UAV) และการใช้กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ในพื้นที่บ่อเหมือง

แม่เมาะพบว่าความเป็นไปได้ที่จะนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้รังวัดควบคู่ไปกับวิธีการทำงานในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าผลการวิจัยในครั้งนั้นจะยังไม่ผ่านเกณฑ์ความถูกต้องที่เหมาะสมสำหรับการรังวัดในเหมืองแม่เมาะก็ตาม [1] หลังจากนั้นได้มีการทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่บ่อเหมืองเปิดทางตอนใต้ของสาธารณรัฐประชาชนจีนจำนวน 3 แห่งพบว่าข้อมูลจากทั้งสองอุปกรณ์มีความใกล้เคียงกันกว่า 90% [2] ประกอบกับเทคโนโลยีของอากาศยานไร้คนขับที่พัฒนามากยิ่งขึ้น และข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้นจากการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน ทำให้มีความเป็นไปได้ที่ผลลัพธ์จากการรังวัดทั้งสองอุปกรณ์มีความใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น

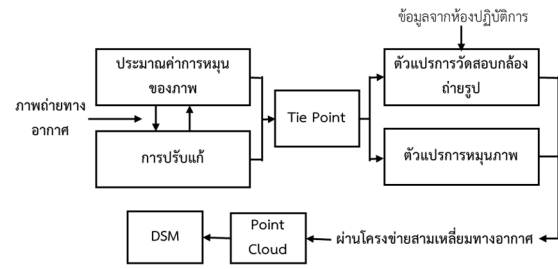
2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

การนำภาพถ่ายทางอากาศมาใช้สำหรับการหาตำแหน่งของวัตถุบนพื้นดินนั้นอาศัยหลักการซ้อนทับกันของภาพถ่ายแต่ละภาพทำให้เกิดเป็นแบบจำลองสามมิติขึ้น โดยอ้างอิงจากทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่ายเชิงเลข และสำหรับการหาแบบจำลองสามมิติของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินนั้น อาศัยหลักการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน โดยใช้การวัดระยะด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์

2.1. ทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่ายเชิงเลข

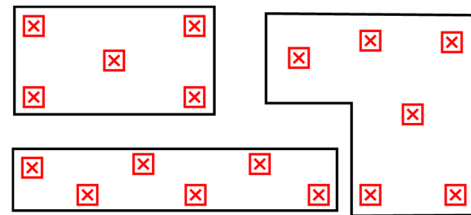
การถ่ายภาพทางอากาศทั้งจากอากาศยานและอากาศยานไร้คนขับใช้ทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่ายเชิงเลข (Photogrammetry) ในการประมวลผลทั้งสิ้น โดยขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการวางแผนการบินเป็นแนวเส้นตรง ให้มีการซ้อนทับของข้อมูลระหว่างภาพถ่ายสองภาพด้านหน้า-หลัง (Overlap) และการซ้อนทับของข้อมูลระหว่างแนวนอน (Sidelap) ซึ่งการซ้อนทับนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับต้องการความละเอียดของข้อมูลในรูปแบบสามมิติและลักษณะความซับซ้อนของพื้นที่เก็บข้อมูล ตามปกติภาพถ่ายแต่ละภาพจะมีการระบุตำแหน่งพิกัดจุดเปิดถ่ายของกล้องถ่ายรูปด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม Global Navigation Satellite System หรือ GNSS ที่ติดอยู่กับอากาศยาน เมื่อได้ภาพถ่ายที่ทับซ้อนกันในพื้นที่สนใจมาแล้วจะมีการนำเข้าสู่คอมพิวเตอร์ประมวลผล เพื่อจัดทำารวัดสอบกล้องถ่ายภาพ (Camera Calibration) และการหมุนภาพ (Image Orientation) ตามปกติแล้วการวัดสอบกล้องถ่ายภาพจะมีการทำในห้องปฏิบัติการ แต่โปรแกรมประมวลผลจะมีการคำนวณการวัดสอบและการหมุนภาพร่วมด้วยโดยอาศัยการคำนวณจากจุดร่วม (Tie point) เดียวกันที่ปรากฏอยู่ในสองภาพขึ้นไป จุดร่วมเหล่านี้จะถูกตรวจหาโดยโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศโดยอัตโนมัติโดยอาศัยพิกัดตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพร่วมคำนวณด้วย และประมาณค่าการหมุนของภาพ (Exterior Orientation parameters) และปรับแก้ (Adjustment) จนได้ค่าตำแหน่งและการหมุน ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, K$) ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงและสามารถค้นหาจุดร่วมของภาพถ่ายได้ [3]

เมื่อได้พารามิเตอร์ค่าการวัดสอบกล้องและการหมุนของภาพแล้วก็สามารถนำมาคำนวณตามวิธี Automated Dense Image Matching Techniques ได้เป็น Point Cloud ที่มีค่าพิกัดแบบสามมิติและมีสีตามภาพถ่ายออกมา ซึ่งสามารถนำ Point Cloud ไปจัดทำเป็นพื้นผิวสามมิติ (Digital Surface Model; DSM) ต่อไปขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายเชิงเลขแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 การรังวัดยึดโยงค่าพิกัดทางตรง (Direct Georeferencing)

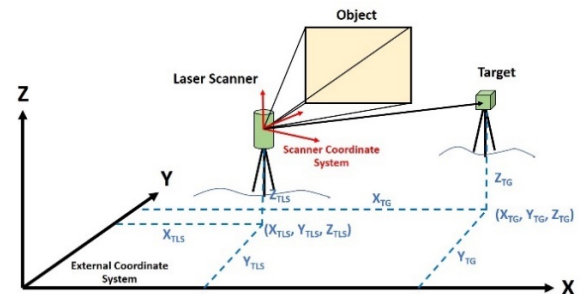
การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่ต้องการความละเอียดสูงนั้นจำเป็นที่จะต้องมียุคควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCP) ที่มีค่าพิกัดสามมิติถูกต้องสูง และสามารถมองเห็นได้เด่นชัดจากภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบ Fast static หรือแบบ Real Time Kinematic (RTK) และมีการกระจายตัวอย่างดีทั่วทั้งพื้นที่บินถ่ายภาพ ตามหลักเรขาคณิต ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การกระจายตัวของ GCP ของพื้นที่ในรูปแบบต่าง ๆ

2.2. ทฤษฎีการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน

การรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินอาศัยหลักการหาตำแหน่งพิกัดจุดที่รังวัดด้วยการทราบพิกัดของจุดตั้งเครื่องสแกนและมุมอะซิมุท (Azimuth) ซึ่งการทำงานจริงจะสามารถทราบมุมอะซิมุทได้จากการตั้งเป้าเล็งที่ทราบพิกัดที่อยู่ห่างออกไปในระยะทางที่เหมาะสม วิธีหาตำแหน่งพิกัดแบบนี้เรียกว่าการรังวัดยึดโยงค่าพิกัดทางตรง (Direct Georeferencing) แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การรังวัดยึดโยงค่าพิกัดทางตรง (Direct Georeferencing)

การรังวัดยึดโยงค่าพิกัดทางตรงนี้ให้ค่าความถูกต้องดีกว่าการรังวัดค่าพิกัดทางอ้อม (Indirect Georeferencing) โดยเฉลี่ยแล้วให้ค่าความถูกต้องที่ RMSE 1.6 เซนติเมตร ที่ระยะการรังวัด 90 เมตร

และการตั้งเครื่องสแกนหลายครั้งในพื้นที่เดียวกันให้ผลลัพธ์การสแกนที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น [4]

สำหรับการทำงานของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินนั้นมีหลักการวัดอยู่สองแกน ได้แก่ แกนราบ (Horizontal) และแกนตั้ง (Vertical) ของกล้อง โดยมีจุดกำเนิดเลเซอร์เป็นจุดศูนย์กลางในการใช้อ้างอิงตำแหน่งวัตถุที่ถูกตกกระทบทั้งหมด ซึ่งสามารถทราบตำแหน่งได้จากองค์ประกอบสามประการ คือ มุมราบ มุมตั้ง และระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังวัตถุ สำหรับการคำนวณมุมราบและมุมตั้งนั้นอ้างอิงจากมุมในการหมุนของแกนราบและแกนตั้งของกล้อง แต่การวัดระยะทางของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินไปยังวัตถุนั้นอาศัยหลักการสามรูปแบบ คือ การวัดระยะเวลาของแสงเลเซอร์ (Pulse round trip time) และการวัดความต่างเฟสของคลื่น (Phase shift measurement) และการรังวัดสามเหลี่ยม (Triangulation) [5]

สำหรับหลักการการทำงานของเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินระยะไกลที่นำมาใช้งานภายในเหมืองขนาดใหญ่นั้นอาศัยหลักการวัดระยะทางด้วยเวลาของการเดินทางแสงเลเซอร์ในระดับนาโนวินาที ด้วยสมการ

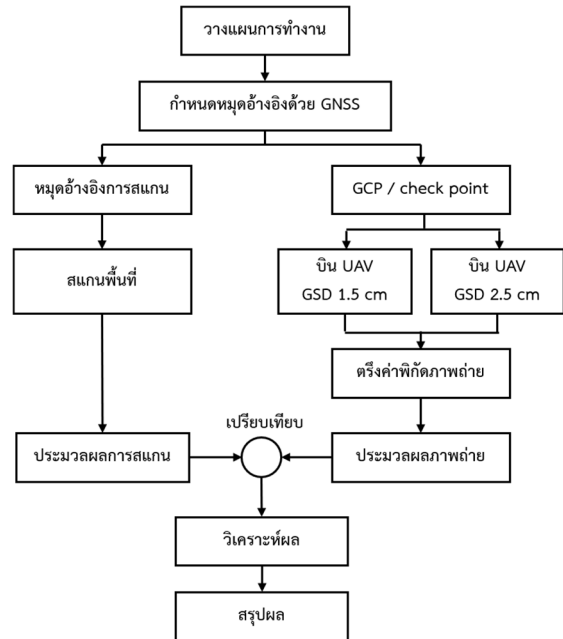
$$r = c \cdot \Delta t / 2 \quad (1)$$

เมื่อ r คือระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังวัตถุ, c คือความเร็วแสงที่ 299,792,458 m/s และ t คือเวลาในการส่งไปและรับสัญญาณกลับของคลื่น ยกตัวอย่างเช่นในระยะเวลา 5 นาโนวินาที คลื่นจะเดินทางได้ระยะ 1.5 เมตร เป็นต้น และการปล่อยคลื่นเลเซอร์ออกไปแต่ละครั้งอาจกระทบวัตถุมากกว่า 1 ชั้น เช่นการกระทบไปไม้แล้วสะท้อนกลับเป็นคลื่นแรก คลื่นบางส่วนทะลุผ่านไปสะท้อนวัตถุด้านหลังตามมาเป็นคลื่นที่สอง คลื่นที่สาม ไปจนถึงคลื่นสุดท้าย แต่หากปล่อยคลื่นออกไปยังทิศทางที่ไม่มีวัตถุตั้งอยู่ หรืออยู่ไกลเกินกว่าที่กล้องจะตรวจจับได้ คลื่นก็จะไม่สะท้อนกลับมาทำให้จุดบริเวณนั้นไม่มีข้อมูล

3. วิธีการวิจัย

การทำงานเปรียบเทียบการรังวัดจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับ โดยจะยึดถือปริมาตรที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินเป็นค่าอ้างอิง เนื่องจากไม่สามารถหาปริมาตรที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่รังวัดชุด-ชน ขนาดใหญ่ได้ และในปัจจุบัน กฟผ. ได้มีการทดสอบและรับรองผลการรังวัดจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินแล้วว่ามีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ สถานที่ทำการวิจัยจะใช้พื้นที่บางส่วนของบ่อเหมืองแม่เมาะ อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง โดยทำการเก็บข้อมูลรังวัดจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและข้อมูลจาก UAV ที่ความละเอียดจุดภาพแตกต่างกันสองรูปแบบคือ ความละเอียดบนพื้นที่หรือระยะบนพื้นดิน (Ground Sampling Distance; GSD) ขนาด

1.5 cm /pixel และ 2.5 cm/pixel ด้วยการบินที่เพดานบินต่างกัน ก่อนนำมาตรงค่าพิกัดภาพถ่าย ประมวลผลและเปรียบเทียบตามแผนผังขั้นตอนการปฏิบัติงานวิจัยใน รูปที่ 4



รูปที่ 4 ผังงานขั้นตอนการวิจัย

3.1. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้อุปกรณ์สองประเภทเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบการทำงานกัน ได้แก่ กลุ่มงานสแกนภาคพื้นดิน และกลุ่มงานภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

กลุ่มงานสแกนภาคพื้นดินใช้งานเครื่องเลเซอร์สแกน Maptek I-site XR3 จากประเทศออสเตรเลีย ระยะการสแกน 2.5 - 2,400 เมตร มุมการสแกนทางราบ 360° และทางตั้ง 100° [6] พร้อมใช้อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 ที่รับสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบ RTK ที่ความถูกต้องทางราบ ±8 mm + 1 ppm และความถูกต้องทางตั้ง ±15 mm + 1 ppm [7] ใช้สำหรับการวางตำแหน่งหมุดควบคุมสำหรับตั้งกล้องสแกนและเป้าสำหรับอ้างอิงมุมอะซิมูท

กลุ่มงานภาพถ่ายทางอากาศใช้อากาศยานไร้คนขับ Wingtra One จากประเทศสวิตเซอร์แลนด์ เป็นอากาศยานแบบปีกตรึง (Fix wing) สองใบพัด ความยาวปีก 125 เซนติเมตร ระยะเวลาการบินสูงสุด 55 นาที ที่ความเร็ว 35.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กล้องถ่ายภาพ Sony RX1RII ความละเอียด 42 Megapixels ที่ความยาวโฟกัส 35 mm [8] พร้อมใช้อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 ในการวางตำแหน่ง GCP มีลักษณะเป็นแผ่นไวนิลลายตารางหมากรุกสีขาวดำขนาด 1x1 เมตร ด้วยวิธีการรังวัดแบบ RTK ต่อจุดใช้เวลา 3 นาที จากการอ้างอิงเวลาที่ใช้รังวัดจากผู้ผลิตหลายราย [9] และระเบียบกรมที่ดิน [10] ทั้งนี้ได้มีการทดสอบใน

พื้นที่บ่อเหมืองแม่เมาะแล้วจะสามารถรังวัดอ้างอิงค่าพิกัดจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมถาวร (Continuously Operating Reference Stations; CORS) ที่ติดตั้งอยู่ในพื้นที่เหมืองแม่เมาะด้วยวิธีรังวัดแบบ RTK ได้ [11]



รูปที่ 5 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย Maptek I-site Laser scanner (ซ้ายบน) แผ่นเป้าควบคุมภาพถ่าย GCP (ขวาบน) Wingtra One UAV (ขวาล่าง)

3.2. การรังวัดภาคสนาม

การรังวัดภาคสนามเพื่อให้เกิดการควบคุมปัจจัยด้านสภาพอากาศและการหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปมากที่สุด ในแต่ละพื้นที่ทดสอบจะต้องมีการรังวัดจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับในวันและเวลาเดียวกัน ในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง ไม่มีเมฆปกคลุม โดยที่ช่วงเวลารังวัดคือ 9:00 – 11:30 น. เพื่อหลีกเลี่ยงอากาศร้อนจัด และหลีกเลี่ยงช่วงเวลาที่มึนจากผลกระทบของแสงอาทิตย์สูง ในช่วงเช้าหรือเย็นของวัน สำหรับการเลือกพื้นที่ทดสอบนั้นจะเป็นพื้นที่ที่ไม่มีการเคลื่อนไหวมาเป็นระยะเวลาหนึ่งแล้ว โดยจะไม่มีเครื่องจักรหรืออุปกรณ์อื่นใด ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการรังวัดอยู่ในพื้นที่ โดยเลือก 3 พื้นที่ที่มีความเหมาะสมและมีลักษณะภูมิประเทศและพื้นที่ที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พื้นที่ทดสอบภายในบ่อเหมืองแม่เมาะ

ชื่อพื้นที่	วัสดุพื้นผิว	ประเภทรถขุด
T1	หินดินดาน	Backhoe
T2	ถ่านหินลิกไนต์	Shovel
T3	ดินแดง	Bucket Wheel

แต่ละพื้นที่มีตำแหน่งที่ตั้ง ดังรูปที่ 6 และมัลักษณะพื้นที่ ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 แผนที่ตำแหน่งที่ตั้งพื้นที่ทดสอบภายในบ่อเหมืองแม่เมาะ



รูปที่ 7 พื้นที่ทดสอบภายในบ่อเหมืองแม่เมาะ พื้นที่ T1 (บน), พื้นที่ T2 (ล่างซ้าย) และ พื้นที่ T3 (ล่างขวา)

เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินสแกนแต่ละพื้นที่เพื่อใช้เป็นพื้นผิวอ้างอิงใช้ความละเอียดที่ระยะห่างระหว่างจุดสแกนสองจุด 8 เซนติเมตร ที่ระยะ 100 เมตร โดยการตั้งจุดสแกนหลายครั้งมาทับซ้อนกันจนได้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด มีรายละเอียดและระยะเวลาการสแกน ระยะเวลาการขึ้นบินอากาศยานไร้คนขับบนท้องฟ้าที่ไม่รวมเวลาติดตั้ง GCP ตามตารางที่ 2 จะสังเกตเห็นว่าระยะเวลาที่ใช้ในสนามของการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินจะมากกว่าการเก็บข้อมูลภาคสนามของอากาศยานไร้คนขับอยู่ 3 – 6 เท่า แต่กลับใช้ระยะเวลาการประมวลผลน้อยกว่า 50% เมื่อนำเวลาที่ใช้ภาคสนามและการประมวลผลมาผนวกกัน การรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับจะใช้เวลาน้อยกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้ การเก็บข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับจะประหยัดเวลาไปได้มากหากพื้นที่การรังวัดปริมาตรมีขนาดที่กว้างใหญ่เพิ่มขึ้น เพราะจะต้องเพิ่มจำนวนครั้งการติดตั้งเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและใช้เวลาไปปฏิบัติงานสนามที่เพิ่มขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้ควบคุมจำนวนบุคลากรและกำลังคนที่ใช้อุปกรณ์ในแต่ละ

เครื่องมือวัดไว้เท่ากัน

ตารางที่ 2 จำนวนครั้ง ระยะเวลาการสแกนและระยะเวลาถ่ายภาพทางอากาศในแต่ละพื้นที่

ชื่อพื้นที่	T1	T2	T3
จำนวนจุดตั้งการสแกน	5 ครั้ง	3 ครั้ง	4 ครั้ง
เวลาที่ใช้ในการสแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกน	90 นาที	45 นาที	75 นาที
เวลาในการประมวลผลข้อมูลจากเครื่องเลเซอร์สแกน	30 นาที	25 นาที	45 นาที
เวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วย UAV	13 นาที	13 นาที	15 นาที
เวลาการประมวลผลข้อมูลจาก UAV	60 นาที	45 นาที	75 นาที

การบินในแต่ละพื้นที่จะขึ้นบิน 1 ครั้ง โดยบินที่ความสูงการวางแผนให้ GSD เป็น 1.5 cm/pixel ที่ Overlap 80% และ Sidelap 70% แล้วเปลี่ยนความสูงให้ GSD เป็น 2.5 cm/pixel ที่ Overlap 70% และ Sidelap 65% สำหรับการวางตำแหน่ง GCP ในแต่ละพื้นที่จะคำนึงถึงการกระจายตัวให้ทั่วทั้งพื้นที่ตามหลักการถ่ายภาพทางอากาศ และแต่ละพื้นที่จะมี GCP ประมาณ 6 - 8 จุด และจุดทดสอบ (Check Point) 4 จุด [12] โดยในแต่ละพื้นที่มีจำนวนภาพและจำนวน GCP ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 จำนวนภาพถ่ายจาก UAV และจำนวน GCP ที่ใช้ในแต่ละพื้นที่

ชื่อพื้นที่	จำนวนภาพที่ GSD 1.5 cm	จำนวนภาพที่ GSD 2.5 cm	จำนวน GCP	จำนวน Check Point
T1	287	48	7	4
T2	226	50	6	4
T3	279	62	8	4

3.3. การประมวลผล

หลังจากที่ได้ข้อมูลภาคสนามมาแล้ว ได้นำข้อมูลการสแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมาประมวลผลผ่านโปรแกรม Maptek Point Studio เพื่อรวมจุดจากการสแกนหลายครั้งให้เป็น Point Cloud แล้วสร้างพื้นผิวสามมิติออกมาเป็นพื้นผิวอ้างอิง

สำหรับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับจะถูกนำมาระบุตำแหน่งให้ภาพมีความถูกต้องมากขึ้นด้วยการตั้งค่าพิกัดจากสถานีฐานรับสัญญาณดาวเทียม GNSS (CORS) ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ตั้งอยู่บริเวณที่ทำการเหมืองแม่เมาะ ผ่านวิธีการ Post Processing Kinematic (PPK) และนำมาประมวลผลภาพให้เป็น Point Cloud ด้วยหลักการทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่ายเชิงเลขผ่านโปรแกรม Pix4D Mapper ด้วยความ

ละเอียด Point Cloud ที่ 2 เท่าของขนาด GSD ก่อนนำไปสร้างพื้นผิวสามมิติและคำนวณปริมาตรเปรียบเทียบในโปรแกรม Maptek Point Studio

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ ได้ทำการตรวจสอบจุดทดสอบ (Check Point) จากแต่ละพื้นที่ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ตรงพิกัดด้วย GCP แล้ว กับตำแหน่งที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณ GNSS พบว่าข้อมูลมีความคลาดเคลื่อน RMS ทางตำแหน่งทางราบสูงสุด 1.5 เซนติเมตร ทางตั้ง 6.2 เซนติเมตร ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละพื้นที่ทดสอบทั้งหมดพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของจุดทดสอบหากบินที่ความละเอียด GSD 2.5 เซนติเมตรจะสูงกว่าการบินที่ระดับ GSD 1.5 เซนติเมตรเล็กน้อย ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่า RMS ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดทดสอบในแต่ละพื้นที่

ชื่อพื้นที่	UAV GSD	ค่า RMS ความคลาดเคลื่อนของจุดทดสอบ (m)			
		E	N	ทางราบ	ทางตั้ง
T1	1.5 cm	0.008	0.005	0.009	0.016
	2.5 cm	0.010	0.011	0.015	0.027
T2	1.5 cm	0.009	0.010	0.013	0.046
	2.5 cm	0.006	0.014	0.015	0.062
T3	1.5 cm	0.004	0.004	0.006	0.010
	2.5 cm	0.004	0.006	0.007	0.010

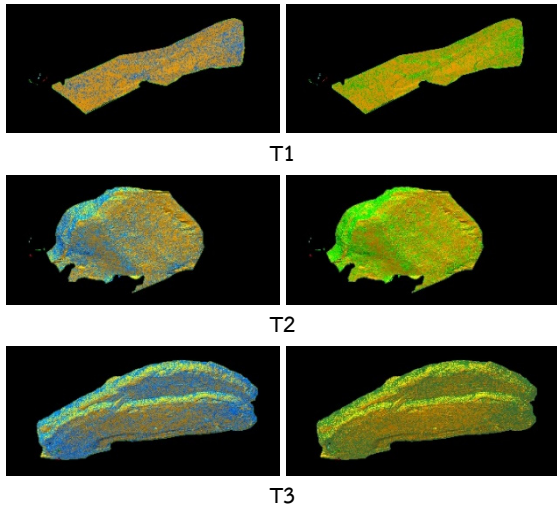
หลังจากนำข้อมูล Point Cloud และพื้นผิวจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและข้อมูลอากาศยานไร้คนขับมาเปรียบเทียบกันในด้านขนาดพบว่าจำนวนจุดข้อมูล Point Cloud ของอากาศยานไร้คนขับมีข้อมูลมากกว่าจำนวนข้อมูลที่ได้จากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินประมาณ 60 เท่าที่ GSD 1.5 เซนติเมตร และ 15 - 20 เท่าที่ GSD 2.5 เซนติเมตร ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 จำนวนจุด Point cloud ที่ได้จากข้อมูลจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับ

ชื่อพื้นที่	จำนวนจุด Point Cloud (ล้านจุด)		
	Laser Scanner	UAV (GSD 1.5 cm)	UAV (GSD 2.5 cm)
T1	0.233	17.875	4.923
T2	0.202	11.238	3.276
T3	0.226	11.127	3.385

จากการประมวลผลเพื่อคำนวณปริมาตรที่แตกต่างกันระหว่างพื้นผิวจากการรังวัดจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและพื้นผิวจากภาพถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 1.5 เซนติเมตร และ GSD 2.5 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้ว

พื้นผิวจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินอยู่สูงกว่าพื้นผิวจากอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 8 พื้นผิวจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (สีส้ม) เปรียบเทียบกับพื้นผิวที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 1.5 เซนติเมตร (สีน้ำเงิน) และ GSD 2.5 เซนติเมตร (สีเขียว) ในแต่ละพื้นที่ทดสอบ

และเมื่อนำข้อมูลจากการประมวลผลมาคำนวณปริมาตรที่แตกต่างกันระหว่างการรังวัดจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 1.5 เซนติเมตร และ GSD 2.5 เซนติเมตร ได้ข้อมูลตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณเปรียบเทียบความแตกต่างปริมาตรระหว่างข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับและข้อมูลจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน

ชื่อพื้นที่	ขนาดพื้นที่ (sq.m)	ความแตกต่างปริมาตรจาก UAV เทียบกับ Laser Scanner				
		UAV GSD	Scanner			ค่าความต่างทางตั้ง
			Cut (m ³)	Fill (m ³)	Overall (m ³)	
T1	50,529	1.5 cm	3,771.50	163.87	-3,607.63	-7.1 cm
		2.5 cm	3,170.41	196.21	-2,974.20	-5.9 cm
T2	36,077	1.5 cm	2,041.52	296.49	-1,745.03	-4.8 cm
		2.5 cm	2,037.85	331.57	-1,706.28	-4.7 cm
T3	38,786	1.5 cm	1,039.90	612.28	-427.62	-1.1 cm
		2.5 cm	765.75	893.49	127.75	+0.3 cm

หมายเหตุ: ค่าความต่างทางตั้งคือปริมาตร / พื้นที่

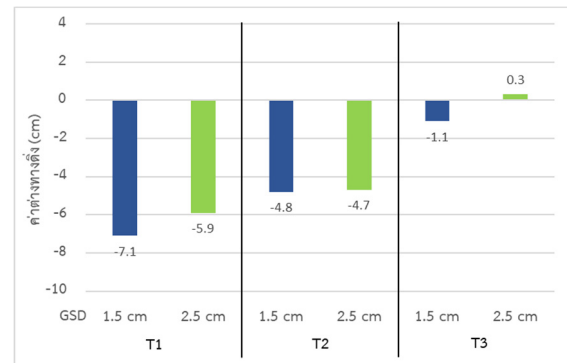
Cut = พื้นผิว UAV อยู่ต่ำกว่าพื้นผิว Laser Scanner

Fill = พื้นผิว UAV อยู่สูงกว่าพื้นผิว Laser Scanner

จากข้อมูลพบว่าปริมาตรที่แตกต่างกันระหว่างสองอุปกรณ์เมื่อนำมาหารด้วยขนาดพื้นที่แล้วมีความแตกต่างกัน -7.1 ถึง -1.1 เซนติเมตร เมื่อใช้การบินด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ขนาด GSD 1.5 เซนติเมตร และ -5.9 ถึง 0.3 เซนติเมตร เมื่อใช้การบินที่ขนาด

GSD 2.5 เซนติเมตร จะสังเกตได้ว่าการใช้ขนาดความละเอียดภาพน้อยที่ GSD 2.5 เซนติเมตร ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมากกว่าเล็กน้อยในทุกพื้นที่การทดสอบ ซึ่งไม่ได้แสดงให้เห็นว่าข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับที่ละเอียดขึ้นจะได้ข้อมูลที่มีความใกล้เคียงกับการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินเสมอไป ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการบินที่ GSD 1.5 เซนติเมตรมีความละเอียดมากกว่าข้อมูลจากการสแกนกว่า 60 เท่า

สำหรับความแตกต่างระหว่างลักษณะพื้นที่ในแต่ละพื้นที่การทดสอบนั้นพบว่าการรังวัดปริมาตรด้วยอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ดินแดง ประเภทรถขุดแบบบั๊กกีหมุน (Bucket Wheel) ที่มีหน้าผาการขุดที่สูงชันในพื้นที่ T3 นั้นให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการรังวัดด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินที่สุด ตามมาด้วยพื้นที่ถ่านหินลิกไนต์สีดำที่ถูกขุดด้วยรถขุดขนาดใหญ่ (Shovel) ที่มีหน้าผาการขุดที่สูงชันพอสมควร และพื้นที่ที่มีความแตกต่างทางปริมาตรสูงสุดคือพื้นที่ T1 หินดินดาน ที่มีหน้าผาการขุดไม่สูง แต่มีความไม่สม่ำเสมอของพื้นมากกว่าพื้นที่อื่น



รูปที่ 9 ความแตกต่างทางตั้ง (ปริมาตรต่อพื้นที่) ระหว่างข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 1.5 เซนติเมตร (สีน้ำเงิน) และ 2.5 เซนติเมตร (สีเขียว) ที่แตกต่างจากข้อมูลจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (ค่าอ้างอิง) ในแต่ละพื้นที่ทดสอบ

5. สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบเปรียบเทียบความแตกต่างปริมาตรที่รังวัดได้จากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดภาพแตกต่างกันใน 3 พื้นที่ทดสอบบริเวณบ่อเหมืองแม่เมาะพบว่าปริมาตรที่รังวัดได้หารด้วยขนาดพื้นที่ หรือค่าแตกต่างทางระดับมีค่าระหว่าง -7.1 ถึง 0.3 เซนติเมตร ด้วยอากาศยานไร้คนขับแบบ Fix wing รุ่น Wingtra One บันทึกภาพที่ความละเอียดบนพื้นที่หรือระยะบนพื้นดิน (GSD) 1.5 ถึง 2.5 เซนติเมตร และประมวลผลตำแหน่งจุดเปิดถ่ายด้วยวิธี PPK พร้อมจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP) 6 - 8 จุดต่อพื้นที่ แสดงให้เห็นว่า

ปัจจุบันสามารถนำอากาศยานไร้คนขับมาช่วยในการรังวัดเพื่อคำนวณปริมาตรได้ในสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยและความถูกต้องทางตั้ง อยู่ในระดับต่ำกว่า 8 เซนติเมตร โดยพื้นที่ที่แสดงค่าความแตกต่างกันของปริมาตรใกล้เคียงกับเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมากที่สุดเป็นพื้นที่ที่มีพื้นผิววัสดุที่ค่อนข้างเรียบ บดอัดแน่น และไม่เป็นที่กั้นขนาดใหญ่ ผู้วิจัยมีข้อสังเกตว่าจากการบินถ่ายภาพทางอากาศที่ GSD 2.5 เซนติเมตรให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเครื่องเลเซอร์สแกนมากกว่า แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการบินที่ GSD 2.5 เซนติเมตรจะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จะต้องอาศัยข้อมูลการบินในลักษณะที่แตกต่างกันเพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาความสูงบินและความละเอียดภาพที่เหมาะสมต่อไป โดยการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างนี้พบว่าการบินนำอากาศยานไร้คนขับเข้ามาร่วมใช้งานกับข้อมูลจากเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินมีความเป็นไปได้ ซึ่งจะทำให้การรังวัดปริมาตรจุด-ชน ในพื้นที่ขนาดใหญ่มีความรวดเร็วในการทำงานสนามมากยิ่งขึ้น รวมทั้งมีความละเอียดถูกต้องของข้อมูลเพิ่มขึ้นในจุดอับ จุดที่มีวัตถุบังสัญญาณ หรือพื้นดินในพื้นที่สูง ที่เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินไม่สามารถรังวัดได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือสำรวจภาคสนาม คอมพิวเตอร์และโปรแกรมประมวลผลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และบุคลากรที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจภาคสนามในแผนกรังวัดเหมือง กองวางแผนปฏิบัติการฝ่ายวางแผนและบริหารเหมืองแม่เมาะ ที่ทุ่มเทแรงกายและแรงใจทำงานภาคสนามในพื้นที่บ่อเหมือง ทางคณะผู้จัดทำวิจัยขอขอบคุณทุกภาคส่วนที่ร่วมมือกันจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พุทธิพล ดำรงชัย และคณะ (2560). การศึกษาความเป็นไปได้ในการหาปริมาตรจุดชนดินหินปกคลุมและถ่านหินในเหมืองแม่เมาะ โดยอากาศยานไร้คนขับ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- [2] Tong, X., Liu, X., Chen, P., Liu, S., Luan, K., Li, L., et al. (2015). Integration of UAV-Based Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Three-Dimensional Mapping and Monitoring of Open-Pit Mine Areas. *Remote Sensing*, 7(6), pp. 6635-6662.

- [3] Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D. (2011). UAV Photogrammetry for mapping and 3 D modelling – Current Status and Future Perspectives. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, pp.25-31.
- [4] ณัฐสรณ์ คุปตะวามิช (2558). การศึกษาปัจจัยทางเรขาคณิตของการสแกนที่มีผลต่อความถูกต้องของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน. วศ.ม.วิศวกรรมสำรวจ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] Norbert Pfeifer and Christian Briele (2007). *Laser Scanning – principles and applications*. Vienna University of Technology and Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Austria.
- [6] Maptek Pty Ltd (2017). *Maptek I-Site XR3 Technical Specifications*.
- [7] Trimble Navigation Limited (2013). *Trimble R10 GNSS SYSTEM datasheet*.
- [8] Wingtra AG (2018). *WingtraOne Technical Specification Sheet*.
- [9] Gakstatter, E. (2009, February 3). *Survey Perspectives: What's Your Occupation Time?*. GPS World, Retrieved from <https://www.gpsworld.com/surveywhats-your-occupation-time-7307>
- [10] กรมที่ดิน (2558). ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network) ในงานรังวัดเฉพาะราย.
- [11] ธนศพล บุญประกอบ และ พุทธิพล ดำรงชัย (2562). ผลกระทบของความยาวเส้นฐานต่อความถูกต้องของการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในพื้นที่บริเวณเหมืองถ่านหินเปิดแม่เมาะ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24, อุดรธานี, 10-12 กรกฎาคม 2562, หน้า 2509-2515.
- [12] Pix4D (2018, November 5). *Do more GCPs equal more accurate drone maps?*. Retrieved from <https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps>