การสำรวจและทำแผนที่เพื่อออกแบบและการลงตำแหน่งก่อสร้างอาคารโรงโม่สุราษฎร์ผาทอง จังหวัดสุราษฎร์ธานี

Surveying and Mapping for Design and Setting out Plant of Suratpathong Surat Thani Province

ประกอบ มณีเนตร[1] ภุชงค์ วงษ์เกิด[2] รณชัย บำเพ็ญอยู่[3] กฤษฎา มณีเนตร[4] และอรุณยุพา บัวทรัพย์[5]

[1,2,3]สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
[4]บริษัท เอ็ม.ซี.อี.เอเชีย จำกัด
[5]สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี

[1,4]E-mail address: prakobku@gmail.com, [2,3]E-mail address :p.wongkoet@gmail.com, [5]E-mail address : arunyupa-j@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในโครงการได้มีการสร้างหมุดควบคุมทางราบและหมุดควบคุมทางดิ่งจำนวน สี่ หมุดกระจายในพื้นที่โครงการโดยโยงยึดกับหมุดหลักฐานของกรมทางหลวงชนบทจำนวน สอง หมุดมีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ Order C1-II ของ FGCC1989 ได้ทำแผนที่โดยการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับและใช้โปรแกรม Pix 4D. ในการประมวลผลค่าพิกัดและระดับของวัตถุและพื้นดินหาได้จากภาพออร์โธ และหาโดยRobotic Total Station และวิธีRTKจากการตรวจสอบความถูกต้องแผนที่จำนวน 9 จุดแผนที่มีความถูกต้องเทียบเท่าแผนที่มาตราส่วน 1: 500ตามมาตรฐาน วสท. และ ASPRS โดยความถูกต้องแผนที่มีระดับความเชื่อมั่น 95% และได้มีการลงตำแหน่งอาคารตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้จำนวน 11 จุดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%ตามมาตรฐานวสท. และตามมาตรฐาน FGDC

คำสำคัญ : ภาพออร์โธ, ความถูกต้องแผนที่, การลงตำแหน่ง

Abstract

Setting four horizontal and vertical control points distributed over the project area, reference to two GPS monuments of Department of Rural Roads. The accuracy of control points are better than Order C1-II of FGCC1989. Photogrammetric mapping by drone and Pix 4D Program. For mapping, coordinates and elevations of objects and ground points are determined from Orthophotos and also by Robotic Total Station and by RTK. By checking 9 well-defined points, map accuracy conforms to Equivalent Map Scale 1:500 for Standards of EIT and ASPRS at 95% confidence level. And setting out coordinates of buildings as specified in designed map for 11 points at 95% confidence level, conforming to Standards of EIT and FGDC Geospatial Positioning Standards.

Keywords : Orthophotos, Map accuracy, Setting out coordinates

1. คำนำ

ในปัจจุบันการสำรวจทำแผนที่โดยการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ได้มีการนำมาใช้ในการออกแบบรายละเอียดการก่อสร้างโดยมีความถูกต้องดีกว่ามาตรฐานแผนที่มาตราส่วน 1 : 500 ซึ่งเป็นแผนที่ที่ใช้ในการใช้ในการออกแบบรายละเอียดตามมาตรฐาน ASCE [1] อีกทั้งได้มีการใช้เครื่องมือการสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GNSS ในการทำหมุดควบคุมทางราบและทางดิ่งโดยวิธีสถิต (Static) ซึ่งมีความถูกต้องทางราบดีกว่า 50 ppm ตามมาตรฐาน FGCC 1989 [2] และมีความถูกต้องทางดิ่งตามเกณฑ์งานระดับชั้นที่ 3 ตามมาตรฐาน FGCC 1984 [3] และมาตรฐานวสท. [9] และได้มีการใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรังวัดวิธี RTK รวมทั้งใช้กล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Robotic Total Station) เก็บรายละเอียดในการทำแผนที่ และลงตำแหน่งก่อสร้าง เนื่องจากสามารถรังวัดหาพิกัดและระดับได้อย่างรวดเร็วมีความถูกต้องสูงและได้มาตรฐานการรังวัด

จึงได้ทำการศึกษาวิจัยในพื้นที่โครงการโรงโม่สุราษฎร์ผาทอง อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ได้มีการสร้างหมุดควบคุมทางราบและหมุดควบคุมทางดิ่งจำนวนสี่ หมุด กระจายในพื้นที่โครงการโดยโยงยึดกับหมุดหลักฐานของกรมทางหลวงชนบทจำนวนสองหมุดได้ทำแผนที่สำหรับการออกแบบรายละเอียดโดยการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ร่วมกับการใช้กล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Total Station) และเก็บรายละเอียดเพิ่มเติมในการทำแผนที่ และลงตำแน่งก่อสร้างตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ให้เป็นไปตามมาตรฐานของวสท.หรือมาตรฐานสากล

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างและรังวัดหาพิกัดทางราบ และระดับสูงของหมุดควบคุมทางราบ และหมุดควบคุมทางดิ่งในพื้นที่โครงการโรงโม่สุราษฎร์ผาทอง อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยโยงยึดกับหมุดหลักฐานของกรมแผนที่ทหารหรือหน่วยราชการที่เชื่อถือได้

2. เพื่อทำแผนที่สำหรับการออกแบบก่อสร้างในพื้นที่โครงการ โดยการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ และเก็บรายละเอียดเพิ่มเติมด้วยกล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Total Station) และวิธีRTK ให้ได้แผนที่ที่มีความถูกต้องตามมาตรฐานวสท. และมาตรฐานASPRS

3. เพื่อลงตำแหน่งก่อสร้างอาคารตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ให้ได้ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานวสท. และมาตรฐานFGDC

3. การทบทวนวรรณกรรม

3.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

เล็ก จูฑะสุต (2527) ได้ศึกษาการสำรวจและออกแบบแนวสายส่งศักย์สูงโดยเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่าย พบว่าการเปรียบเทียบจากแผนที่และรูปตัดตามแนวด้วยเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่าย ให้ผลใกล้เคียงกับการสำรวจภาคพื้นดิน[11]

ศิริพร ตรีธาร ดีบุญ เมธากุลชาติ และวัชรินทร์ วิทยกุล (2561) ได้ศึกษาความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับสำหรับงานออกแบบเรขาคณิต พบว่า จากการประมวลผลภาพถ่ายโดยใช้ UAV ที่ระดับความสูงบิน 95 เมตร ได้ค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 4 เซนติเมตร และค่าความถูกต้องทางดิ่งเท่ากับ 5 เซนติเมตร ซึ่งมีความถูกต้องตามมาตรฐานของงานสำรวจภูมิประเทศสำหรับงานออกแบบรายละเอียด [12]

ชัยวัฒน์ พรมทองและคณะ (2548) ได้รายงานการวิจัยเรื่องค่าความสูงออร์โธเมตริกจากการสำรวจด้วยดาวเทียม GPS ในประเทศไทย ได้รายงานผลการวิจัย สรุปได้ว่าค่าความสูงออร์โธเมตริกที่ใช้จากการปรับแก้โครงข่ายหมุดหลักฐานระบบ GPS ทั้งประเทศ ไม่สามารถนำไปใช้แทนการวัดระดับชั้นที่ 3 ได้ แต่อาจนำไปใช้ในการสำรวจหาความสูงออร์โธเมตริกในเฉพาะพื้นที่ที่มีขนาดไม่กว้างนักได้ [8]

วัชโรตม์ พันโยธา (2561) ได้ศึกษาการประเมินความถูกต้องค่าระดับสูงภูมิประเทศโดยใช้แบบจำลองจีออยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทยในพื้นที่ติดตามการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล พบว่าค่าระดับสูงภูมิศาสตร์ที่รังวัดด้วยดาวเทียม GNSS แบบสถิตมีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean error) เท่ากับ 0.017 เมตร และค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เท่ากับ 0.085 เมตร โดยวิธีการหาค่าระดับสูงภูมิประเทศแบบสัมบูรณ์ [10]

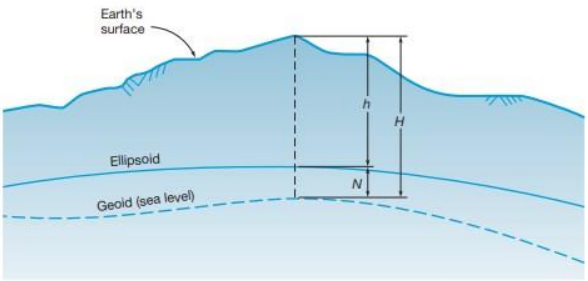
3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 กรอบอ้างอิงระบบดาวเทียม GNSS

ระบบกรอบอ้างอิงที่ใช้อ้างอิงตำแหน่งดาวเทียมจีพีเอส คือ World Geodetic System 1984 (WGS84) ประกอบด้วยทรงรี WG584 และแกนอ้างอิงสามมิติ XYZ มีจุดศูนย์กลางมวลของโลกเป็นจุดกำเนิดในระบบพิกัด Geocentric Coordinate System โดยจุด origin อยู่ที่ Mass Center ของโลก แกน X ผ่าน Greenwich Meridian แกน Z อยู่บนแกนหมุนของโลก (Conventional Terrestrial Pole : CTP) และแกน Y อยู่บนระนาบศูนย์สูตรในระบบมือขวา (right-handed coordinate system) เช่นเดียวกับตำแหน่งดาวเทียมในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจะมี software แปลงพิกัดจากระบบพิกัดของดาวเทียมในแต่ละระนาบ มาเป็นระบบพิกัด Geocentric Coordinate System และนำข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมมาคำนวณปรับแก้โครงข่ายดาวเทียม (GNSS Network) ในระบบพิกัดนี้ค่าที่ปรับแก้จากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS แล้ว จะแปลงเป็นระบบพิกัดภูมิศาสตร์คือพิกัดละติจูด (Latitude) และพิกัดลองจิจูด (Longitude) และความสูงเหนือทรงรี (Ellipsoidal height)) ซึ่งระบบพิกัดภูมิศาสตร์สามารถแปลงเป็นพิกัดกริดในระบบUTM (Universal Transverse Mercator) ได้ [5]

3.2.2 การหาระดับสูงจากการรังวัดด้วยดาวเทียม GNSS

จากการรังวัดโครงข่ายดาวเทียม GNSS เมื่อปรับแก้โครงข่ายแล้วจะได้ค่าพิกัดพิกัดละติจูด (Latitude) และพิกัดลองจิจูด (Longitude) และความสูงเหนือทรงรี h (Ellipsoidal height) ซึ่งจากค่าพิกัดละติจูด และค่าพิกัดลองจิจูดสามารถคำนวณหาค่าความสูงจีออยด์N (geoid height or geoid undulation or geoid separation) จากโปรแกรมแบบจำลองจีออยด์แล้วคำนวณหาค่าระดับสูง H (Elevation or Orthometric height) จากความสัมพันธ์ $H = h - N$ ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นความสัมพันธ์ของทั้งสามค่าดังกล่าว [5]



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับ ค่าความสูงเหนือทรงรี และค่าความสูงเหนือจีออยด์

3.3 มาตรฐานถูกต้องแผนที่ (Accuracy Standards for Mapping) [1][9]

มาตรฐาน ASPRS (The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) ได้กำหนดมาตรฐานความถูกต้องของแผนที่เป็นดังนี้

3.3.1 ความถูกต้องทางราบ (Horizontal Accuracy)

ASPRS 2014 ได้กำหนดให้ค่าคลาดเคลื่อนที่รังวัดจากจุดตรวจสอบที่เด่นชัด (Well – defined points) โดยคำนวณค่า RMSEx และRMSEy จะต้องมีความถูกต้องเท่ากับหรือดีกว่า 0.25 มม. คูณส่วนกลับ

มาตราส่วนแผนที่ (ให้เป็น X) สำหรับแผนที่ที่เป็น Hard Copy และเนื่องจากปัจจุบันแผนที่เป็น Soft Copy หรือเป็นแผนที่ดิจิทัล หรือแผนที่ภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto map) โดยที่ FGDC (The Federal Geographic Data Committee) ได้กำหนดมาตรฐานความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่ (NSSDA : National Standard for Spatial Data Accuracy) นั่นคือ RMSEx≤X, RMSEy≤X และ RMSEr≤ 1.414X และความถูกต้องทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 (Horizontal Accuracy at 95 % Confidence Level) ≤ 2.448*X

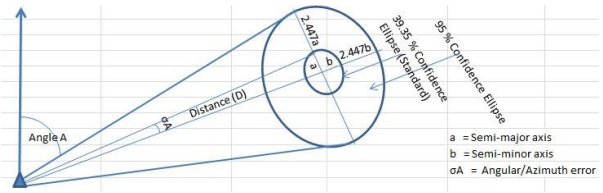
3.3.2 ความถูกต้องทางดิ่ง(Vertical Accuracy)

ASPRS 2014 ได้กำหนดให้ค่า RMSEz ต้องดีกว่าหรือเท่ากับ 1 ใน 3 ของช่วงเส้นชั้นความสูง (Contour Interval) (ให้ X = 1/3*C.I.) สำหรับพื้นดินที่ไม่มีพืชปกคลุม และความถูกต้องทางดิ่งที่ระดับความเชื่อมั่น95 (Vertical Accuracy at 95 % Confidence Level) ≤ 1.96*X

ตัวอย่าง แผนที่ตามมาตรฐานวสท [9] และมาตรฐาน ASPRS สำหรับแผนที่มาตราส่วน 1 : 500 และช่วงเส้นชั้นความสูง (Contour Interval) เท่ากับ 0.25เมตร ค่า RMSEx และ RMSEy จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าถูกต้องทางราบ 0.125 เมตร สำหรับ Class 1 และค่า RMSEz จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าถูกต้องทางดิ่ง คือ1 ใน 3 ของช่วงเส้นชั้นความสูง หรือ 0.083 เมตร ซึ่งจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความถูกต้องทางราบ 0.306 เมตรที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และจะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.163 เมตร ที่ความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐาน FGDC : Federal Geographic Data Committee และ NSSDA : National Standard for Spatial Data Accuracy [4]

3.4 การลงตำแหน่งด้วยกล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Robotic Total Station)

ในการลงตำแหน่งอาคารหรือเครื่องจักรด้วยกล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Robotic Total Station) เพื่อให้การลงตำแหน่งมีความเชื่อมั่นในระดับ 95 % [5] จะต้องทราบ ค่าคลาดเคลื่อนทางระยะที่ยอมให้เป็นเท่าใด และความคลาดเคลื่อนของกล้องเป็นเท่าใด รูปที่ 2 แสดงค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานวงรี *a และ b*และค่าคลาดเคลื่อนวงรีที่ความเชื่อมั่น 95 %



รูปที่ 2 วงรีคลาดเคลื่อน

ซึ่งยกตัวอย่างอธิบายดังนี้ ถ้าค่าคลาดเคลื่อนทางระยะ (Position Accuracy) เท่ากับ 0.025 เมตร ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนทางพิกัดจะเท่ากับ 0.025/√2 เท่ากับ 0.018 เมตรถ้าต้องการรังวัดเพื่อลงพิกัดให้มีความเชื่อมั่น 95 % ค่าคลาดเคลื่อนในการลงพิกัดจะต้องเท่ากับหรือน้อยกว่า (ดีกว่า) 0.018/2.4477 หรือ 0.007 เมตร และถ้ากล้องมีความละเอียดถูกต้อง 5 ฟิลิปดา ระยะทางไกลสุดจากจุดตั้งกล้องต้องไม่เกินกว่า 0.007/tangent (5second) เท่ากับ 297 เมตร ที่ในระดับความเชื่อมั่น 95 %

4. กรอบแนวคิดในการวิจัย

4.1 สร้างหมุดควบคุมทางราบและระดับ จำนวน 4 หมุด เพื่อเป็นหมุดควบคุมทางราบและหมุดควบคุมทางดิ่งในการทำแผนที่สำหรับการออกแบบก่อสร้าง และลงตำแหน่งก่อสร้างในพื้นที่โครงการโรงโม่สุราษฎร์ผาทอง อำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี

4.2 รังวัดโครงข่ายดาวเทียมของหมุดควบคุมทางราบและหมุดควบคุมทางดิ่งด้วยเทคนิค Relative Positioning วิธี Static โดยยึดโยงกับหมุดที่ทราบพิกัดทางราบและระดับ ให้มีความละเอียดถูกต้องเท่ากับหรือดีกว่าตามเกณฑ์ Order CI ของมาตรฐาน FGCC1989 (Federal Geodetic Control Committee 1989) [1] และคำนวณปรับแก้โครงข่ายดาวเทียมวิธี Least square คำนวณหาค่าความสูงเหนือจีออยด์(Geoid Undulation) จาก TGM2017 แล้วคำนวณหาค่าระดับสูงด้วยวิธีโครงข่ายดาวเทียม GNSS

4.3 ทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto Map) สำหรับการออกแบบก่อสร้างโดยการบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับและเก็บรายละเอียดเพิ่มเติมด้วยกล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ

4.4 ลงตำแหน่งก่อสร้างตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ ให้การลงตำแหน่งมีความเชื่อมั่นในระดับ 95 %

5.ระเบียบวิธีวิจัย

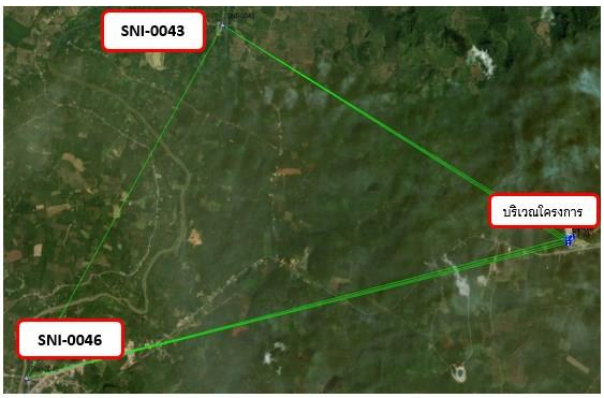
ดำเนินงานในพื้นที่ของโครงการโรงโม่สุราษฎร์ผาทองอำเภอคีรีรัฐนิคม จังหวัดสุราษฎร์ธานี ดังนี้

5.1 การสร้างหมุดควบคุมทางราบและทางดิ่ง

ได้สร้างหมุดควบคุมทางราบและทางดิ่งในพื้นที่โครงการ จำนวน 4 หมุด คือ หมุด PT–01หมุดPT–02หมุดPT–03 และหมุด PT–04 โดยยึดโยงกับหมุดหลักฐานของกรมทางหลวงชนบทจำนวน2หมุดคือหมุดSNI-0043 และหมุดSNI-0046 เป็นงานรังวัดโครงข่ายดาวเทียม (GNSS Network)

5.2 การรังวัดโครงข่ายดาวเทียม

ได้ตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ Geodetic GPS's (Dual frequency) จำนวนอย่างน้อย 4 - 6 เครื่องโดยตั้งเหนือหมุดหลักฐานของกรมทางหลวงชนบทคือหมุดSNI-0043 และหมุดSNI-0046 และตั้งเหนือหมุดที่สร้างขึ้นทั้ง 4 หมุด โดยรังวัดด้วยเทคนิค Relative Positioning วิธี Static รังวัดพร้อมกันไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง ซึ่งจะต้องรังวัดให้ครบทุกหมุดเป็นโครงข่ายดาวเทียม (GNSS Network) ดังแสดงในรูปที่ 3 และรูปที่ 4



รูปที่ 3 โครงข่ายดาวเทียมSNI-0043 SNI-0046 ยึดโยงมายังหมุดในโครงการ

รูปที่ 4 โครงข่ายดาวเทียมหมุดในโครงการยึดโยงมายัง SNI-0043 SNI-0046

การรังวัดด้วยเทคนิคดังกล่าวเพื่อชดเชย ค่าคลาดเคลื่อนจากนาฬิกาและเวลาในเครื่องจีพีเอส ค่าการหักเหของแสงในชั้นบรรยากาศ ionospheric & tropospheric และค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบอื่นๆ โดยค่ามาตรฐานความถูกต้องสำหรับความถูกต้องทางตำแหน่งสัมพัทธ์ที่ความเชื่อมั่น 95% (Accuracy Standards for Geometric Relative Positioning Accuracy at 95% Confidence Level) จะต้องเท่ากับหรือดีกว่า 1 : 20,000 or 50 ppm ตามเกณฑ์Order C2-II ของมาตรฐาน FGCC1989 (Federal Geodetic Control Committee 1989) [2] ดังแสดงในรูปที่ 5

Elevation difference accuracy standards for geometric relative positioning techniques.

(95 percent confidence level)

Order	Class	Minimum elevation difference accuracy standard		(From table 1) Minimum geometric relative position accuracy standard	Minimum geoid height difference accuracy standard	
		p_H (ppm)	1:e	p (ppm)	p_N (ppm)	1:n
AA	-	2	1:500,000	0.1	2	1:500,000
A	-	2	1:500,000	0.1	2	1:500,000
B	-	5	1:200,000	1	5	1:200,000
1	-	15	1: 67,000	10	10	1:100,000
2	I	20	1: 50,000	20	10	1:100,000
2	II	50	1: 20,000	50	20	1: 50,000
3	I	100	1: 10,000	100	40	1: 25,000

NOTE: THESE ELEVATION DIFFERENCE ACCURACY STANDARDS ARE TO BE USED ONLY FOR ELEVATION DIFFERENCES DETERMINED INDIRECTLY FROM ELLIPSOID HEIGHT DIFFERENCE MEASUREMENTS.

FOR DIRECT VERTICAL MEASUREMENT TECHNIQUES SUCH AS DIFFERENTIAL OR TRIGONOMETRIC LEVELING, USE ONLY THE ACCURACY STANDARDS GIVEN IN THE FGCC 1984 DOCUMENT, SECTION 2.2, PAGES 2-2 and 2-3.

รูปที่ 5 มาตรฐานความถูกต้องผลต่างระดับสำหรับความถูกต้องทางตำแหน่งสัมพัทธ์

5.3 ปรับแก้โครงข่ายดาวเทียมด้วยวิธีลิสท์สแควร์ (Least square adjustment)

ได้รังวัดค่าพิกัดทางราบโดยโยงยึดกับหมุดหลักฐานSNI-0043 และ SNI-0046 ของกรมทางหลวงชนบทโดยใช้ค่าพิกัดยูทีเอ็ม (UTM Coordinate) บนพื้นหลักฐานทรงรี WGS 84 และค่าระดับสูง (Elevation) เป็นโครงข่ายดาวเทียม (GNSS network) ใช้โปรแกรม Magnet Tool ร่วมกับ TGM2017 คำนวณและปรับแก้โครงข่ายดาวเทียมด้วยวิธีลิสท์สแควร์ โดยFixed Both (Horizontal and Vertical) ที่หมุดหลักฐาน SNI-0043 และSNI-0046 จากการคำนวณปรับแก้หมุดทั้ง 4 มีค่าคลาดเคลื่อนบรรจบทางราบและระดับในแต่ละ Loop ต่ำสุดเท่ากับ 0.03ppm (ราบ) 0.05 ppm (ระดับ) และสูงสุดเท่ากับ 5.27ppm (ราบ) 30.90 ppm (ระดับ) ซึ่งมีความละเอียดถูกต้องดีกว่า 1 : 20,000 หรือ 50 ppm ตามเกณฑ์ Order C1-II ของมาตรฐานของ FGCC 1989 ได้แสดงค่าพิกัดกริดยูทีเอ็ม (UTM Coordinate) ค่าระดับสูง (Elevation above mean sea level) ดังแสดงในตารางที่ 1จากตารางดังกล่าวได้คำนวณและแสดงค่า Mean Grid Factor ไว้สำหรับทอนระยะราบบนพื้นดินเป็นระยะกริดในระบบพิกัดยูทีเอ็มด้วย

ตารางที่ 1 ค่าพิกัดยูทีเอ็มและระดับสูง

Name	N	E	Elevation	Remark
SNI-0043	992340.158	491311.056	14.105	Fixed
SNI-0046	985536.024	487491.125	21.343	Fixed
PT-01	988233.014	498006.050	32.240	
PT-02	988179.197	498012.021	31.741	
PT-03	988138.867	498017.283	32.140	
PT-04	988258.775	498099.733	35.705	
Mean Grid factor			0.999598664	

5.4 ทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto Map)

ได้ทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto Map) สำหรับออกแบบก่อสร้างโดยการบินถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับครอบคลุมพื้นที่ 0.097 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 60 ไร่ สร้างจุดควบควบภาพถ่าย (Ground Control Points) จำนวน 7 จุด และจุดตรวจสอบความถูกต้อง (Check Points) จำนวน 9 จุด ครอบคลุมพื้นที่โครงการ โดยได้รังวัดพิกัดและระดับจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบด้วยวิธี RTK ในการบินถ่ายภาพใช้ค่า GSD เท่ากับ 2.52 cm/pixel แล้วนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Pix 4 Dจากรายงานคุณภาพดังแสดงในรูปที่ 6 สรุปการตรวจสอบคุณภาพการถ่ายภาพ และในรูปที่ 7 แสดง ค่าRMSE ของจุดควบควบภาพถ่าย (GCPs) และจุดตรวจสอบความถูกต้อง(Check Points)

Summary

Project	เกาะลอย1
Processed	[illegible]
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.52 cm / 0.99 in
Area Covered	0.097 km² / 9.6902 ha / 0.04 sq. mi. / 23.9575 acres
Time for Initial Processing (without report)	37m:44s

Quality Check

Images	median of 46720 keypoints per image
Dataset	283 out of 283 images calibrated (100%), all images enabled
Camera Optimization	3.91% relative difference between initial and optimized internal camera parameters
Matching	median of 19381.1 matches per calibrated image
Georeferencing	yes, 7 GCPs (7 3D), mean RMS error = 0.022 m

รูปที่ 6 สรุปการตรวจสอบคุณภาพการถ่ายภาพ

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
102 (3D)	0.020/ 0.020	0.003	0.015	-0.070	0.387	30 / 30
104 (3D)	0.020/ 0.020	-0.004	0.001	0.026	0.346	50 / 50
107 (3D)	0.020/ 0.020	-0.011	-0.018	-0.046	0.417	50 / 50
113 (3D)	0.020/ 0.020	0.035	0.020	0.014	0.504	114 / 114
116 (3D)	0.020/ 0.020	0.002	-0.003	0.017	0.512	58 / 58
117 (3D)	0.020/ 0.020	-0.024	-0.007	-0.016	0.455	72 / 72
120 (3D)	0.020/ 0.020	-0.018	-0.005	0.035	0.469	13 / 13
Mean [m]		-0.002474	0.000360	-0.005816		
Sigma [m]		0.017744	0.012259	0.036693		
RMS Error [m]		0.017916	0.012265	0.037151		

0 out of 9 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
101		-0.0005	-0.0077	-0.0190	0.4316	42 / 42
103		-0.0044	-0.0171	-0.0708	0.4368	70 / 70
105		-0.0011	0.0005	0.0228	0.3318	40 / 40
108		-0.0100	-0.0182	0.0312	0.4989	71 / 71
109		-0.0062	-0.0180	-0.0225	0.4055	97 / 97
110		-0.0157	-0.0099	-0.0372	0.3453	85 / 85
111		-0.0191	-0.0188	0.0198	0.6007	89 / 89
114		0.0039	-0.0230	-0.0227	0.5524	82 / 82
121		0.0020	0.0028	0.0111	0.3099	68 / 68
Mean [m]		-0.005673	-0.012163	-0.009698		
Sigma [m]		0.007454	0.008600	0.031523		
RMS Error [m]		0.009367	0.014896	0.032981		

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
102 (3D)	0.020/ 0.020	0.003	0.015	-0.070	0.387	30 / 30
104 (3D)	0.020/ 0.020	-0.004	0.001	0.026	0.346	50 / 50
107 (3D)	0.020/ 0.020	-0.011	-0.018	-0.046	0.417	50 / 50
113 (3D)	0.020/ 0.020	0.035	0.020	0.014	0.504	114 / 114
116 (3D)	0.020/ 0.020	0.002	-0.003	0.017	0.512	58 / 58
117 (3D)	0.020/ 0.020	-0.024	-0.007	-0.016	0.455	72 / 72
120 (3D)	0.020/ 0.020	-0.018	-0.005	0.035	0.469	13 / 13
Mean [m]		-0.002474	0.000360	-0.005816		
Sigma [m]		0.017744	0.012259	0.036693		
RMS Error [m]		0.017916	0.012265	0.037151		

0 out of 9 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
101		-0.0005	-0.0077	-0.0190	0.4316	42 / 42
103		-0.0044	-0.0171	-0.0708	0.4368	70 / 70
105		-0.0011	0.0005	0.0228	0.3318	40 / 40
108		-0.0100	-0.0182	0.0312	0.4989	71 / 71
109		-0.0062	-0.0180	-0.0225	0.4055	97 / 97
110		-0.0157	-0.0099	-0.0372	0.3453	85 / 85
111		-0.0191	-0.0188	0.0198	0.6007	89 / 89
114		0.0039	-0.0230	-0.0227	0.5524	82 / 82
121		0.0020	0.0028	0.0111	0.3099	68 / 68
Mean [m]		-0.005673	-0.012163	-0.009698		
Sigma [m]		0.007454	0.008600	0.031523		
RMS Error [m]		0.009367	0.014896	0.032981		

รูปที่ 7 ค่าRMSE ของจุดควบควบภาพถ่าย (GCPs) และจุดตรวจสอบ (Check Points)

และได้มีการเก็บรายละเอียดอาคารเพิ่มเติมด้วยกล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จและวิธีRTK เพื่อนำไปประกอบแผนที่สำหรับออกแบบก่อสร้างต่อไป

5.5 ตรวจสอบความถูกต้องแผนที่

ตามมาตรฐาน ASCE [1] ได้กำหนดให้แผนที่มาตราส่วน 1 : 500 ถึง 1 : 2000 เป็นแผนที่สำหรับออกแบบทั่วไป (Design Map) และแผนที่มาตราส่วน 1 : 500 ได้กำหนดให้เป็น Critical Design Map และในปัจจุบัน ASPRS 2014 ได้กำหนดให้ค่าความถูกต้องของแผนที่ดิจิทัล และแผนที่ภาพถ่าย เทียบเท่าแผนที่มาตราส่วน1 : 500 ดังได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1

และจากจุดตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ภาพถ่ายจำนวน 9 จุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 เมื่อตรวจสอบค่า RMSEx = 0.0094 เมตร และ RMSEy = 0.0149 เมตรจะมีค่าความละเอียดถูกต้องทางราบที่ความเชื่อมั่นในระดับ 95% เท่ากับ 0.030 เมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.306 เมตร ตามมาตรฐานNSSDA Horizontal Accuracy at 95 % confidence level สำหรับแผนที่มาตราส่วน 1 : 500 และเมื่อตรวจสอบค่า RMSEz = 0.033 เมตร จะมีค่าความละเอียดถูกต้องทางดิ่งที่ความเชื่อมั่นในระดับ 95% เท่ากับ 0.065 เมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.163 เมตร ตามมาตรฐาน NSSDA Vertical Accuracy at 95 % confidence level สำหรับช่วงเส้นชั้นความสูง 0.25 เมตร ในตารางที่ 2เป็นรายการตรวจสอบความถูกต้องแผนที่แสดงให้เห็นว่าแผนที่ภาพถ่ายมีความถูกต้องตามมาตรฐานของ FGDC [4] ซึ่งเป็นมาตรฐานสากล

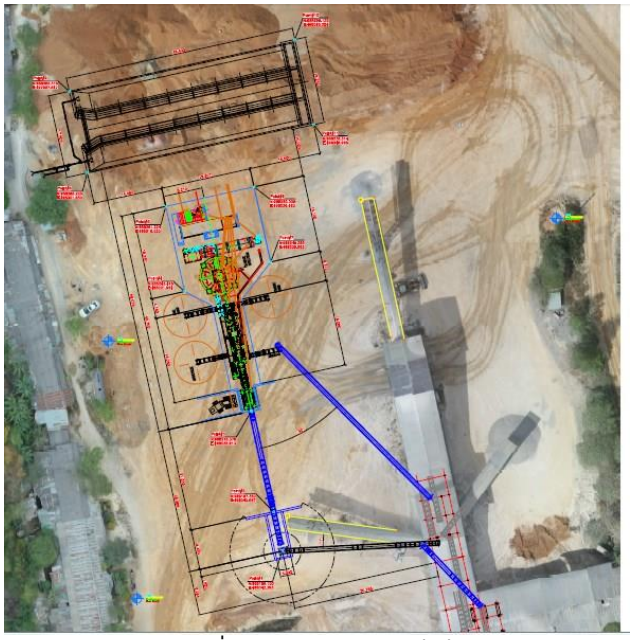
ตารางที่ 2 รายการตรวจสอบความถูกต้องแผนที่

ASPRS 2014 : RMSEx = 0.009 m. ≤ 0.125 m. for map 1 : 500
ASPRS 2014 : RMSEy = 0.015 m. ≤ 0.125 m. for map 1 : 500
ASPRS 2014 : RMSEz = 0.033 m. ≤ 0.083 m. for C.I. 0.25 m.
ASPRS 2014 : RMSEr = $(RMSEx^2 + RMSEy^2)^{1/2}$ = 0.018 m. ≤ 0.177 m. for map 1 : 500
NSSDA Horizontal Accuracy at 95 % confidence level = 0.030 m.≤ 0.306 m. for map 1 : 500
NSSDA Vertical Accuracy at 95 % confidence level = 0.065 m. ≤ 0.163 m. for C.I. 0.25 m.
: By The Federal Geographic Data Committee (FGDC)

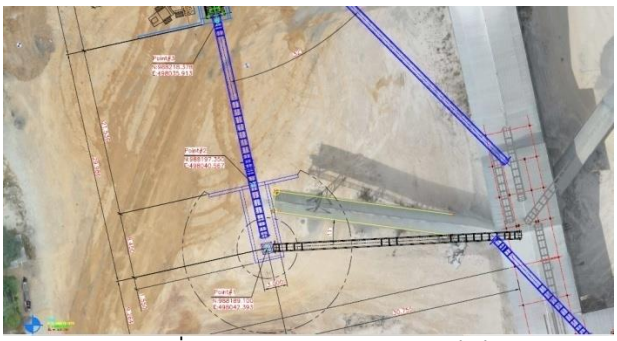
5.6 การวางตำแหน่งอาคาร และลงตำแหน่งก่อสร้างอาคาร

แผนที่ภาพถ่ายที่ได้ตรวจสอบความถูกต้องแล้ว จึงนำส่งผู้ออกแบบรายละเอียดการวางตำแหน่งอาคาร และให้ลงตำแหน่งก่อสร้างอาคารตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ ดังนี้

5.6.1 เมื่อผลิตแผนที่ภาพได้ที่ได้มาตรฐานสากล จึงได้นำส่งผู้ออกแบบรายละเอียดการวางตำแหน่งอาคารโรงโม่ (Plan Layout) 11 รายการ เช่น อุโมงค์สร้างใหม่ สร้างสายพานใหม่สำหรับรับหินจากสายพานหินคลุกเดิม สร้างบ่อน้ำตกตะกอน สร้าง Chute ใหม่ ฯลฯ โดยผู้ออกแบบได้กำหนดพิกัดของแต่ละจุดไว้ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9 เป็นภาพขยายการวางตำแหน่งอาคารโรงโม่



รูปที่ 8 การวางตำแหน่งอาคารโรงโม่



รูปที่ 9 ภาพขยายการวางตำแหน่งอาคารโรงโม่

5.6.2 ได้ลงตำแหน่งก่อสร้างอาคารตามพิกัดที่ออกแบบไว้ จำนวน 11 จุด ด้วยกล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ กล้องมีความถูกต้องทางมุม 1ฟิลิปดา ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การลงตำแหน่งก่อสร้างอาคาร

Point	Design		Stake			□N	□E
	N	E	N	E	Elevation		
1	988189.100	498042.393	988189.096	498042.393	31.255	0.004	0.000
2	988197.350	498040.567	988197.349	498040.567	31.360	0.001	0.000
3	988218.378	498035.913	988218.381	498035.912	31.498	-0.003	0.001
4	988243.415	498021.964	988243.413	498021.965	31.608	0.002	-0.001
5	988261.224	498018.023	988261.223	498018.021	31.611	0.001	0.002
6	988265.309	498036.483	988265.310	498036.483	31.700	-0.001	0.000
7	988249.585	498039.963	988249.587	498039.963	31.486	-0.002	0.000
8	988268.225	498001.630	988268.224	498001.628	31.449	0.001	0.002
9	988285.316	497997.847	988285.320	497997.847	33.372	-0.004	0.000
10	988296.135	498045.024	988296.134	498045.026	32.096	0.001	-0.002
11	988278.314	498048.968	988278.315	498048.970	32.025	-0.001	-0.002
RMSE						0.0022	0.0013

ในการลงตำแหน่งอาคารในโครงการนี้ ให้มีการลงตำแหน่งระยะทางคลาดเคลื่อน (Position Accuracy) เท่ากับ 0.025 เมตร ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนทางพิกัดจะเท่ากับ 0.025/√2 เท่ากับ 0.018 เมตร ต้องการรังวัดเพื่อลงพิกัดให้มีระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นค่าคลาดเคลื่อนในการลงพิกัดจะต้องเท่ากับหรือน้อยกว่า (ดีกว่า) 0.018/2.4477 หรือ 0.007 เมตร

จากตารางที่ 3 ค่าRMSEx เท่ากับ 0.001 เมตร และค่าRMSEy เท่ากับ 0.002 เมตร มีค่าน้อยกว่า 0.007 เมตร ดังนั้นการลงตำแหน่งก่อสร้างอาคารในโครงการนี้มีระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ วสท.และ ตามมาตรฐาน FGDC ซึ่งเป็นมาตรฐานสากล

6.ผลการวิจัย

ในโครงการสำรวจและทำแผนที่เพื่อออกแบบและลงตำแหน่งก่อสร้างอาคารโรงโม่สุราษฎร์ผาทอง จังหวัดสุราษฎร์ธานี มีผลงานวิจัย ดังนี้

6.1 ได้มีการสร้างหมุดควบคุมทางราบ และหมุดควบคุมทางดิ่ง จำนวน 4 หมุด คือ หมุด PT–01, หมุดPT–02, หมุดPT–03 และหมุด PT–04 โดยยึดโยงกับหมุดหลักฐานของกรมทางหลวงชนบท จำนวน 2 หมุด คือหมุด SNI-0043 และหมุดSNI-0046 เป็นงานรังวัดโครงข่ายดาวเทียม (GNSS Network) มีค่าคลาดเคลื่อนบรรจบทางราบและระดับดีกว่า 1 : 20,000 หรือ 50 ppm ตามเกณฑ์Order C1-II ของมาตรฐานFGCC 1989 ได้ค่าพิกัดยูทีเอ็ม (UTM Coordinate) และค่าระดับสูง (Elevation) ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งได้คำนวณค่า Mean Grid factor เท่ากับ 0.999598664 สำหรับใช้คูณระยะราบบนพื้นดิน (Ground Distance) เป็นระยะกริด (Grid Distance) ในระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม

6.2 ได้ทำแผนที่ภาพถ่ายเป็นแผนที่ดิจิทัลโดยการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ และได้มีการเก็บรายละเอียดเพิ่มเติมโดยการใช้กล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Robotic Total Station) และวิธีRTK โดยได้มีการตรวจสอบความถูกต้องแผนที่ดิจิทัล มีความถูกต้องเทียบเท่าแผนที่ 1 : 500 ตามมาตรฐานของวสท. และมาตรฐาน ASPRS 2014 ในระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐาน FGDC

6.3 ได้ลงตำแหน่งก่อสร้างตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้จำนวน 11 จุด มีค่าRMSEx เท่ากับ 0.001 เมตร และค่าRMSEy เท่ากับ 0.002 เมตร โดยมีค่าน้อยกว่า 0.007 เมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมให้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สำหรับระยะทางคลาดเคลื่อน (Position Closure) เท่ากับ 0.025 เมตร ที่ยอมให้ในงานก่อสร้าง เป็นไปตามมาตรฐานFGDC

ได้แสดงภาพโมเดลแผนที่ภาพถ่ายค่าพิกัด และค่าระดับสูงของหมุดควบคุม และจุดลงตำแหน่งในรูปที่ 10

รูปที่ 10 ภาพโมเดลแผนที่ภาพถ่าย หมุดควบคุม และจุดลงตำแหน่ง

7.บทสรุป

ในการศึกษาโครงการนี้ค่าพิกัดยูทีเอ็มและค่าระดับสูงที่รังวัดโดยวิธีโครงข่ายดาวเทียม GNSS มีความละเอียดถูกต้องดีกว่าหรือเท่ากับ 1 : 20000 หรือ 50 ppm ซึ่งอยู่ในเกณฑ์กำหนดOrder C1-II ของมาตรฐาน FGCC 1989และโดยที่แผนที่ 1 : 500 เป็นแผนทีสำหรับออกแบบก่อสร้างตามที่ ASCE กำหนดให้เป็น Critical Design Map จึงได้มีการทำแผนที่ภาพถ่ายในโมเดลของแผนที่ดิจิทัลโดยบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งมีความถูกต้องเทียบเท่าแผนที่ 1 : 500 ตามมาตรฐานวสท.และมาตรฐาน ASPRS 2014 และในโครงการนี้ได้มีการลงตำแหน่งก่อสร้างจำนวน 11 จุด ตามพิกัดที่ได้ออกแบบไว้ โดยการใช้กล้องรังวัดแบบเบ็ดเสร็จ (Robotic Total Station) ซึ่งมี Angle Accuracy 1 ฟิลิปดา ซึ่งมีระดับความเชื่อมั่น 95% ในการลงตำแหน่ง ตามมาตรฐาน FGDC [4]

8.ข้อเสนอแนะ

8.1 ในการสำรวจเพื่อออกแบบรายละเอียดและสำรวจเพื่อการก่อสร้างโดยวิธีโครงข่ายดาวเทียม GNSS ควรใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (GPS receivers) อย่างน้อย 3 – 4 เครื่อง มาใช้รังวัดหาพิกัดทางราบและระดับของหมุดควบคุม โดยเทคนิค Relative Positioning รังวัดวิธี Static อย่างน้อย 1 ชั่วโมง

8.2 ในการรังวัดโครงข่ายดาวเทียม GNSS เพื่อหาค่าพิกัดทางราบและระดับสูงของหมุดควบคุมในงานออกแบบรายละเอียดและก่อสร้าง ค่าคลาดเคลื่อนทางราบและระดับที่ยอมให้ควรเท่ากับ หรือดีกว่า Order C2 – II ตามมาตรฐาน FGCC1989 [2] นั่นคือค่าคลาดเคลื่อนทางราบและทางระดับจะต้องเท่ากับหรือดีกว่า 1 : 20,000 หรือ 50 ppm. ซึ่งเทียบเท่าเกณฑ์งานวงรอบชั้นที่ 3 อันดับ 1 ตามมาตรฐาน FGCC1984 [3]

8.3 การทำแผนที่ดิจิทัลสำหรับออกแบบก่อสร้าง ควรทำให้มีความถูกต้องเทียบเท่าแผนที่มาตราส่วน 1 : 100 – 1 : 500 ซึ่งใช้สำหรับการออกแบบรายละเอียดก่อสร้างในส่วนที่มีข้อจำกัดทางตำแหน่งและระดับ (Critical Design Maps) และแผนที่มาตราส่วน 1 : 500 – 1 : 2000 ซึ่งใช้สำหรับการออกแบบทั่วไป(General Design Maps) [1] ซึ่งผู้ออกแบบจะกำหนดมาตราส่วนตามที่ต้องการ

8.4 เนื่องจากการรังวัดหมุดควบคุมในโครงการด้วยวิธีโครงข่ายดาวเทียม GNSS จะต้องมีการคำนวณและปรับแก้ค่าพิกัดและค่าระดับสูงด้วย ซึ่งค่าระดับสูงสามารถใช้แทนวิธีการระดับตามเกณฑ์งานชั้น 3 มาตรฐานวสท. [9] และมาตรฐานFGCC1984 [3] จึงทำงานได้ รวดเร็ว ถูกต้อง และประหยัดค่าใช้จ่าย [7]

8.5 ในแต่ละโครงการเมื่อมีการรังวัดหมุดควบคุมด้วยวิธีโครงข่ายดาวเทียมGNSS ควรยึดโยงกับหมุดGPS และหมุดระดับของกรมแผนที่ทหารหรือยึดโยงกับหมุดหลักฐานของหน่วยงานของทางราชการที่เชื่อถือได้ เพื่อให้เป็นระบบพิกัดอันเดียวกัน ซึ่งจะได้ประโยชน์อย่างมาก และเป็นการสอดรับกับโครงการ One Map ของประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

[1] Anderson and Mikhail. (2000). Surveying Theory and Practice,SeventhEdition, McGraw-Hill Company,Inc, p.792.

[2] FGCC (1989). Geometric Geodetic Accuracy Standards and Specifications for Using GPS Relative Positioning Tecnhiques, pp.123-132.

[3] FGCC (1984). Standards and Specifications for Geodetic Control Networks, pp.3-6 - 3-7.

[4] FGDC(1998) Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy, pp. 3.4-3.16.

[5] Ghilani and Wolf (2012). Elementary Surveying An Introduction to Geomatics. Pearson Educational Limited, pp. 200-201.

[6] Kavannagh (2006). Surveying Principles and Applications. Pearson Prentice Hall.

[7] กรมแผนที่ทหารและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (2017). โครงการพัฒนาแบบจำลองจีออยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทย. หน้า 200 – 201.

[8] ชัยวัฒน์ พรมทอง และคณะ (2548). รายงานการวิจัยเรื่องค่าความสูงออร์โธเมตริกจากการสำรวจด้วยดาวเทียมระบบ GPS ในประเทศไทย. กรมแผนที่ทหาร กองบัญชาการทหารสูงสุด ประเทศไทย .

[9] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) (2558). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาและจัดทำเกณฑ์การปฏิบัติวิชาชีพวิศวกรรมสำรวจ. หน้า 39.

[10] วัชโรตม์ พันโยธา (2561) การประเมินความถูกต้องค่าระดับสูงภูมิประเทศโดยใช้แบบจำลองยีออยด์ความละเอียดสูงของประเทศไทยในพื้นที่ติดตามการทรุดตัวของกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.ประเทศไทย

[11] เล็ก จูฑะสุต (2527) การสำรวจและออกแบบแนวสายส่งศักย์สูงโดยเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่าย.วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.ประเทศไทย

[12] ศิริพร ตรีธาร ดีบุญ เมธากุลชาติ และวัชรินทร์ วิทยกุล (2561) ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับสำหรับงานออกแบบเรขาคณิต กรณีศึกษา โครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน – นครราชสีมา. วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย, ปีที่ 16, ฉบับที่ 1 , หน้า 35 – 46 .